

ĐÁNH GIÁ THỰC NGHIỆM VÀ MÔ PHỎNG ĐỘ THẨM KHÍ CỦA ĐÁ XI MĂNG CÓ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ BẢO HÒA NƯỚC

Từ Sỹ Quân^{a,*}

^a*Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Giao thông Vận tải,
Số 3, phố Cầu Giấy, phường Láng thượng, quận Đống đa, Hà Nội, Việt Nam*

Lịch sử bài viết:

Nhận ngày 28/03/2018, Sửa xong 10/5/2018, Chấp nhận đăng 30/5/2018

Tóm tắt

Độ thẩm khí của một vật liệu có lỗ rỗng là một đại lượng đặc trưng cho khả năng cho phép chất khí đi xuyên qua mà không làm thay đổi cấu trúc của chất đó. Tính thẩm của vật liệu phụ thuộc vào nhiều thông số như độ rỗng, áp suất khí thẩm thấu, hình dạng, độ nhám và tính kết nối giữa các lỗ rỗng. Đối với trường hợp của đá xi măng, trong cấu trúc lỗ rỗng luôn tồn tại hai pha lỏng và khí. Sự tồn tại của nước tự do trong hệ thống lỗ rỗng có ảnh hưởng không nhỏ đến khả năng truyền dẫn và hấp thụ khí của vật liệu. Mô hình thực nghiệm giới thiệu trong bài báo đã được phát triển và ứng dụng tại phòng thí nghiệm về Xây dựng và Cơ học (Laboratoire en Génie Civil et Génie Mécanique) thuộc trường Trung ương thành phố Nantes (Ecole Centrale de Nantes), Cộng hòa Pháp. Trên cơ sở phân tích kết quả đo độ thẩm khí thu được trên các mẫu hình trụ, dựa trên các lý thuyết mô phỏng đã được xây dựng và thiết lập, nghiên cứu cho phép chỉ ra những thông số cần thiết tương ứng với từng loại vật liệu xem xét.

Từ khóa: định luật Darcy; độ thẩm nội tại; hệ số thẩm thủy lực; độ thẩm khí; hiệu ứng Klinkenberg.

EVALUATION BY EXPERIMENT AND MODELING GAS PERMEABILITY OF CEMENT - BASED MATERIALS CONSIDERING THE EFFECT OF THE WATER SATURATION DEGREE

Abstract

The gas permeability is a property of the porous media that measures the capacity of a gas to pass through without altering the structure of the substance. The permeability of the material is depended on many parameters such as porosity, osmotic pressure, shape, roughness and pore connectivity. In the case of hardened cement, two phases, i.e. liquid and gas, exist in its pore structure. The existence of free water in the pore system has a great influence on the ability of the material to transmit and absorb gas. The experimental model introduced in the paper has been developed and applied in the Laboratory of Construction and Mechanics Engineering (Laboratoire en Génie Civil et Génie Mécanique - Ecole Centrale de Nantes), France. Based on the analysis of gas permeability measurements obtained on cylindrical samples and many theoretical simulations have been established and set up, the necessary parameters for each type of material considered are indicated.

Keywords: Darcy's law; intrinsic permeability; hydraulic conductivity; gas permeability; Klinkenberg effect.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12\(4\)-15](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2018-12(4)-15) © 2018 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu chung

Chất lỏng, cụ thể là nước từ lâu đã được sử dụng trong việc đo độ thẩm của vật liệu có nguồn gốc từ xi măng, vốn có giá trị tương đối nhỏ so với các vật liệu rời rạc khác như đất hay cát. Darcy [1] đã

*Tác giả chính. Địa chỉ e-mail: syquantu@gmail.com (Quân, T. S.)

đề xuất ra mô hình thí nghiệm mà theo đó có thể đánh giá độ thấm dựa trên khả năng thẩm thấu và lan tỏa của nước vào hệ thống rỗng của vật liệu. Với những mẫu có kích thước lớn, thời gian đo có thể kéo dài đến cả tháng, khiến công tác thí nghiệm trở nên tốn kém cả về thời gian và công sức.

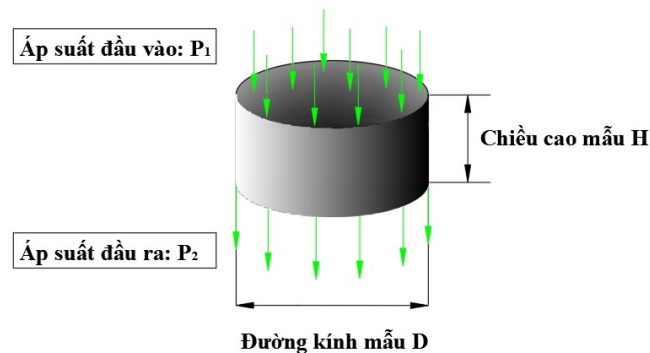
Để khắc phục tình trạng trên, nhiều kỹ thuật đo thấm tiên tiến đã được đề xuất thay thế, chẳng hạn như sử dụng sóng siêu âm hay sử dụng khí trơ đi xuyên qua mẫu. . . Mô hình đo thấm được trình bày trong bài báo dựa trên nguyên lý thay thế nước bằng một loại khí trơ không phản ứng hóa học với bê tông. Về cơ bản, tính chất lý hóa của nước và khí trơ luôn có sự khác biệt. Do vậy, việc sử dụng khí trơ đòi hỏi phải có hiểu biết về đặc điểm của từng loại khí cũng như cách thức tương tác của chúng với vật liệu xem xét.

1.1. So sánh nguyên lý đo độ thấm khí và độ thấm nước

Chất khí thường được ưu tiên sử dụng để đo độ thấm nội tại của mẫu ở trạng thái đóng rắn. Điều này dựa trên khả năng thẩm thấu của chất khí vào môi trường rỗng thấp thường tốt hơn chất lỏng.

Giả sử ta có một mẫu hình trụ vật liệu đồng nhất và đẳng hướng, có đường kính D , chiều cao H chịu áp suất chất lưu đầu vào là P_1 , áp suất đầu ra là P_2 (Hình 1). Ở thang bậc cấu trúc vi mô, chất lưu sử dụng trong thí nghiệm cần thỏa mãn những điều kiện sau:

- Lực quán tính rất nhỏ so với lực dòng gây ra do độ nhớt.
- Dòng chảy thuộc chế độ chảy tầng.
- Chất lưu đi qua không tạo phản ứng hóa học với môi trường đo.



Hình 1. Mô hình hóa thí nghiệm đo độ thấm nước (thấm khí) trong bài toán 1 chiều

Đối với chất lỏng, với giả thiết áp suất tác dụng biến thiên tuyến tính dọc theo chiều cao mẫu, độ thấm nội tại của môi trường khi đó có thể được tính thông qua định luật Darcy [2] :

$$K_v = \frac{\mu_E}{\rho_{EG}} \frac{Q}{S} \frac{H}{P_1 - P_2} \quad (1)$$

trong đó μ_E là độ nhớt động của chất lỏng (Pa.s); ρ_E là khối lượng riêng của chất lỏng (kg/m^3); Q là lưu lượng thấm qua mẫu (m^3/s); S là diện tích thiết diện của mẫu (m^2); H là chiều cao của mẫu (m); g là gia tốc trọng trường (m/s^2); P_1 là áp suất đầu vào của mẫu (m H₂O) và P_2 là áp suất đầu ra của mẫu (m H₂O).

Trong thực tế, khí trơ là chất lưu nén được và dòng chảy của nó không phải là nhớt thuần túy. Do đó, khi thay chất lỏng bằng chất khí ta không thể áp dụng trực tiếp định luật Darcy. Ở thang bậc vi

mô, trong chế độ dừng, dòng chảy của khí trở là sự kết hợp của 2 cơ hệ: dịch chuyển nhớt và dịch chuyển trượt.

Dịch chuyển trượt được tạo ra do sự tương tác giữa phân tử khí và thành lỗ rỗng. Sự trượt càng trở nên quan trọng khi kích thước lỗ rỗng của môi trường là nhỏ và áp suất phun khí là thấp. Với áp suất khí phun là thấp, ứng xử của khí trở có thể được xem như khí lý tưởng [2]:

$$K_a = \frac{Q}{S} \frac{2\mu H P_2}{(P_1^2 - P_2^2)} \quad (2)$$

trong đó K_a là độ thấm tường đối với chất khí (m^2); μ là độ nhớt động (Pa.s); P_1 là áp suất đầu vào của mẫu (Pa) và P_2 là áp suất đầu ra của mẫu (Pa).

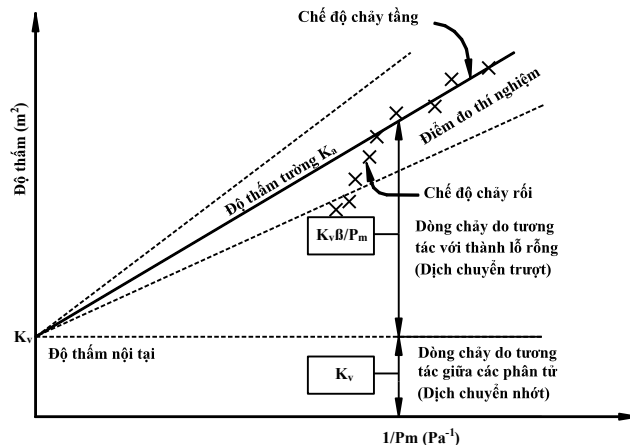
Trong thực tế, độ thấm nội tại phụ thuộc chủ yếu vào cấu trúc lỗ rỗng và độ ẩm của môi trường. Klinkenberg và Carman đã đề xuất ra cách tính độ thấm nội tại từ độ thấm khí. Tuy nhiên mô hình do Klinkenberg đề xuất thường được ưu tiên sử dụng vì sự thuận tiện trong công tác thí nghiệm.

1.2. Hiệu ứng Klinkenberg và cách tính độ thấm nội tại

Độ thấm nội tại K_v trên thực tế là đại lượng chỉ phụ thuộc vào bản thân vật liệu mà không phụ thuộc vào tính chất của khí đi qua. Theo Klinkenberg, độ thấm nội tại K_v là hàm của độ thấm tường K_a và nghịch đảo của áp suất trung bình [3]:

$$K_a = K_v \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \quad \text{với } \beta \text{ là hệ số Klinkenberg (Pa)} \quad (3)$$

Hệ số β phụ thuộc vào độ rỗng của môi trường và tính chất của khí thấm qua. Khi áp suất trung bình P_m tăng, tỉ số $\frac{\beta}{P_m}$ giảm về 0, K_a tiến đến giá trị K_v . Độ thấm nội tại K_v phụ thuộc vào độ ẩm của vật liệu khi làm thí nghiệm. Giá trị K_v tăng khi hàm lượng nước giảm. Với giá trị áp suất trung bình định sẵn, β thể hiện đặc tính của vật liệu đối với một trạng thái độ ẩm đã cho. Lấy xấp xỉ tuyến tính các giá trị của K_a theo nghịch đảo của áp suất trung bình P_m , ta có thể ước lượng được độ thấm nội tại K_v . Trong thực tế, những điểm thuộc chế độ chảy tầng quyết định độ chính xác của việc lấy xấp xỉ K_v như biểu diễn trên Hình 2.

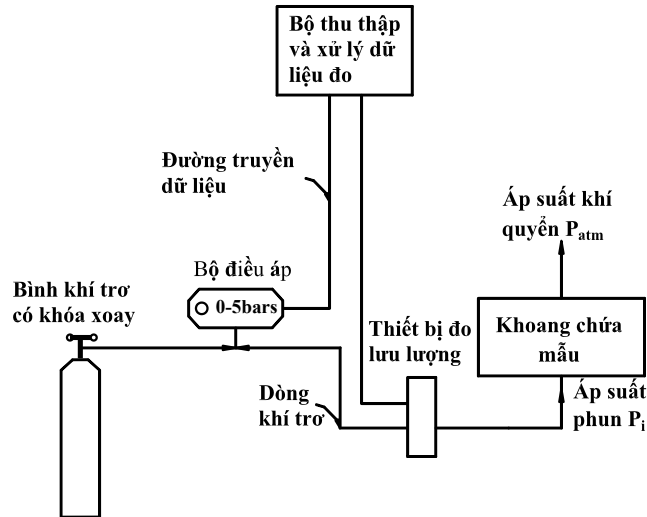


Hình 2. Cách xác định gần đúng độ thấm nội tại theo độ thấm tường

2. Nghiên cứu thực nghiệm đo độ thấm khí

2.1. Sơ đồ thí nghiệm

Thiết bị sử dụng trong phòng thí nghiệm bao gồm một khoang hình trụ loại Cembureau (tên riêng) được sáng chế bởi Kollek [4], chứa mẫu đo độ thấm khí. Sơ đồ hoạt động của hệ thống có thể được miêu tả trên Hình 3:



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm đo độ thấm khí với áp suất phun xác định

Theo Cassanas [5], thiết bị đo bao gồm những dụng cụ như sau (Hình 4):

- Bình khí trơ (azote, argon, helium, hidrogen. . .)
- Bộ điều áp với áp suất phun cực đại 5 bars.
- Khoang chứa mẫu loại Cembureau, cho phép thử với đường kính mẫu thay đổi 5 cm hoặc 10 cm.
- Thiết bị điện tử đo lưu lượng khí, cho phép kiểm soát lưu lượng tối đa 1000 ml/min, với áp suất phun cực đại 10 bars ở nhiệt độ 20°C.

Bộ phận thu thập dữ liệu đo (lưu lượng, áp suất):

- Một máy tính cố định dùng để ghi và xử lý dữ liệu.
- Một áp kế để đo áp suất khí quyển tại thời điểm tiến hành thí nghiệm.
- Một nhiệt kế đo nhiệt độ phòng.

Cụ thể các chi tiết của khoang chứa mẫu loại Cembureau được biểu thị dưới sơ đồ ở Hình 5.

Mẫu thí nghiệm hình trụ, mặt bên được ôm sát bởi một lớp polime đàn hồi chống thấm, có đường kính trong bằng đường kính của mẫu thử (Hình 4(b)). Bộ phận này có tác dụng ngăn cản khí trơ lọt qua thành bên khi làm thí nghiệm. Lớp polime trên được lồng vào trong một buồng khí có dạng hình xăm xe đạp. Khi áp suất trong buồng khí đạt 0,7 MPa, áp suất tác dụng lên mặt bên của mẫu sẽ đủ lớn để coi thành bên của mẫu là kín khí. Mặt trên và mặt dưới của mẫu tiếp xúc với hai đĩa kim loại có rãnh chia. Những rãnh chia này có tác dụng đảm bảo sự phân bố đều đặn của áp suất trên tiết diện mẫu trong quá trình phun (Hình 5).

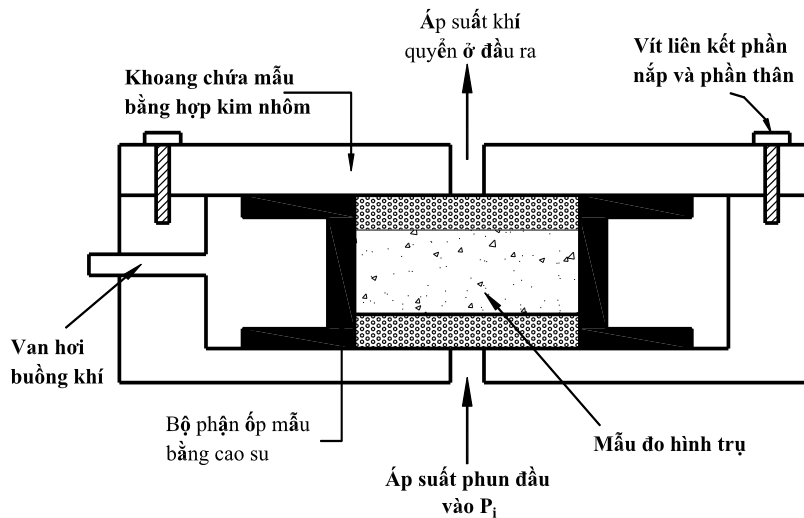


(a)



(b)

Hình 4. a) Các thiết bị đo áp suất, nhiệt độ, lưu lượng và bộ quy đổi tín hiệu; b) Khoang chứa mẫu đo độ thấm khí cho các loại mẫu đường kính 5 cm, 10 cm



Hình 5. Sơ đồ hoạt động khoang chứa mẫu thí nghiệm

2.2. Quy trình chuẩn bị mẫu

Cát Fontainebleau sau khi được sàng ở mắt lưới dao động từ $300\ \mu\text{m}$ đến $3\ \text{mm}$, được trộn với xi măng pooc lăng với tỉ lệ cấp phối trong Bảng 1. Các mẫu được đúc trong khuôn hình trụ bằng nhựa cứng trong suốt có đường kính trong 10 cm, cao 5 cm sau đó được ngâm vào nước trong suốt trong quá trình đông kết.

Công tác chuẩn bị mẫu dùng để đo độ thấm khí có thể được tóm lược gồm các bước như sau [6]:

- Đo kích thước mẫu 3 lần (chiều cao, đường kính) với độ chính xác 0,1 mm. Các vị trí đo tạo với nhau 1 góc 120° .
- Dùng giấy ráp làm nhẵn bề mặt mẫu, sao cho mặt trên và mặt dưới của mẫu song song với nhau và vuông góc với trục đối xứng của mẫu.

- Bọc thành bên của mẫu bằng một lớp bạc mỏng (mẫu lớn) hoặc một lớp cao su co nhiệt (mẫu nhỏ). Lớp này có tác dụng tăng độ nhẵn của bề mặt tiếp xúc giữa mẫu và khoang chứa mẫu, tránh hiện tượng khí lọt qua thành bên.
- Mỗi tổ gồm 4 mẫu đo, ta đánh số mẫu đo theo thứ tự EC%-& chẳng hạn như EC1-2, EC3-2, EC4-3... (EC: Echantillon du Ciment; %: tên tổ mẫu; &: thứ tự trong tổ mẫu).

Bảng 1. Tỷ lệ vật liệu theo khối lượng chế tạo các mẫu hình trụ có đường kính 10 cm, chiều cao 5 cm

Tên tổ mẫu	Xi măng/Cát	Nước/Xi măng
EC1 (4 mẫu)	1,0	0,4
EC2 (4 mẫu)	1,2	0,4
EC3 (4 mẫu)	1,4	0,5
EC4 (4 mẫu)	1,6	0,5

2.3. Quy trình sấy và ổn định độ ẩm mẫu ở nhiệt độ phòng

Một nghiên cứu gần đây, Skoczylas [7] đã chỉ ra rằng đối với loại vữa xi măng có tỉ lệ Nước/Xi măng bằng 0,5, vật liệu tạo thành sau khi đóng rắn gần như đồng nhất sau khi sấy ở 60°C.

Sự thay đổi cấu trúc rỗng của vật liệu phần lớn gây ra do sự bay hơi của nước tự do: kích thước lỗ rỗng trở nên lớn hơn và tính kết nối của chúng cũng tăng lên. Hai tác nhân chính có thể kể đến trong quá trình gia nhiệt là các biến đổi hóa lý kèm theo sự xuất hiện của ứng suất nhiệt: Những bọt khí bị cô lập bên trong vật liệu có xu hướng nở ra, làm hình thành nên những vi nứt thứ cấp. Hệ quả dẫn đến sự tăng độ rỗng và độ thấm dưới tác dụng của nhiệt độ. Khi nhiệt độ sấy đạt ngưỡng 105°C, những vết nứt có xu hướng phát triển hơn cả về số lượng và kích thước cùng với sự bốc hơi của nước tự do và một phần của nước liên kết trong cấu trúc bê tông. Hiệu ứng Klinkenberg đã chỉ ra rằng, khi sấy với thời gian đủ lớn, nếu nhiệt độ sấy dao động trong khoảng 60°C-105°C thì độ thấm gần như không thay đổi.



(a)



(b)

Hình 6. a) Tủ sấy mẫu ở nhiệt độ và độ ẩm xác định; b) Bình thủy tinh ổn định độ ẩm mẫu sau sấy

Như vậy các bước sấy và ổn định độ ẩm mẫu được thực hiện như sau:

- Sấy khô mẫu thử nhằm loại bỏ nước tự do có trong mẫu. Đối với mẫu nhỏ, quá trình gia nhiệt sẽ khiến lớp cao su co nhiệt ôm sát vào thân mẫu (Hình 6(a)).
- Xác định khối lượng mẫu đo.
- Ổn định độ ẩm mẫu, đưa nhiệt độ mẫu đo về nhiệt độ khí quyển nhờ bình thủy tinh chứa hỗn hợp muối hút ẩm, nhằm đảm bảo mẫu có độ ẩm xác định (Hình 6(b)).

Để có thể thiết lập được mối quan hệ giữa độ thấm nội tại và độ bão hòa, hàng ngày các mẫu được cân và ổn định nhiệt rồi tiến hành thí nghiệm đo thấm khí, sau đó lại được đưa trở lại buồng sấy. Quy trình này lặp đi lặp lại đến khi khối lượng mẫu không đổi.

2.4. Quy trình đo độ thấm khí của mẫu

Khí azote được phun từ dưới lên, qua mẫu đo và đi ra ở mặt trên khoang chứa mẫu có áp suất bằng áp suất khí quyển. Áp suất phun dao động từ 0 đến 0,5 MPa, giới hạn cho phép của bộ điều áp. Giá trị này tương ứng với giới hạn lưu lượng cực đại có thể đo được của thiết bị (500 ml/phút hoặc 1000 ml/phút). Trước khi tiến hành thí nghiệm trên các mẫu, ta cần phải kiểm tra độ kín của thiết bị đo thông qua mẫu tiêu chuẩn bằng kim loại (Hình 4(b)) với áp suất khí phun 0,4 MPa. Nếu lưu lượng khí thoát ra nhỏ hơn 5% lưu lượng cực đại có thể phát hiện được thì thí nghiệm mới có thể tiến hành.

Mục đích của thí nghiệm là để xác định độ thấm nội tại K_v thông qua độ thấm khí K_a . Để làm được điều này, ta cần tác dụng các giá trị áp suất khác nhau ở đầu vào của mẫu. Với mỗi giá trị của áp suất phun, ta có được một giá trị của độ thấm tường K_a . Quy trình đo độ thấm có thể tóm lược như sau:

- Tác dụng tối thiểu 4 giá trị áp suất khác nhau nhằm có được mối quan hệ tuyến tính giữa giá trị của K_a theo nghịch đảo của áp suất phun trung bình như sơ đồ minh họa trên Hình 2. Áp suất phun có thể giảm từng bậc từ cao xuống thấp hoặc ngược lại. Cách thức chọn giúp chúng ta đánh giá ảnh hưởng của áp suất phun đến kết quả thu được.
- Với mỗi giá trị của áp suất tác dụng, 5 giá trị của lưu lượng phải được sao lưu trong khoảng thời gian tối thiểu 15 phút. Nếu những giá trị lưu lượng thu được khác nhau quá 2%, ta cần phải chờ cho dòng chảy ổn định rồi thu thập lại số liệu từ đầu.

2.5. Kết quả thí nghiệm thu được

Các mẫu thí nghiệm do vậy đều được sấy ở nhiệt độ 80°C đến khối lượng không đổi nhằm đảm bảo quá trình gia nhiệt không làm thay đổi cấu trúc của vật liệu. Những thí nghiệm trước đó đã chỉ ra rằng, với những mẫu hình trụ tương tự có khối lượng từ 700 g đến 900 g, cần thời gian khoảng 6 ngày để đạt được khối lượng ổn định không đổi. Các mẫu lựa chọn trong thí nghiệm có đường kính 10 cm, chiều cao 5 cm, khối lượng ban đầu dao động từ 800 g đến 880 g. Lượng nước bay hơi chiếm khoảng 8% (từ 60 g đến 75 g) đối với các mẫu sau quá trình xử lý nhiệt. Khối lượng các mẫu sau sấy dao động từ 710 g đến 790 g (Hình 7).

Trong công thức (3), độ thấm tường K_a đặc trưng cho khả năng thẩm thấu khí gas qua hệ thống lỗ rỗng của vật liệu. Sự bay hơi của nước tự do làm tăng đường kính lỗ rỗng cũng như tính kết nối, kéo theo sự giảm dần của hệ số β và sự tăng lên của độ thấm nội tại K_v . Sau mỗi bước sấy, các mẫu lại được đưa ra đo độ thấm khí. Điều này cho phép ta thiết lập mối quan hệ giữa hệ số β , độ thấm nội tại K_v và độ bão hòa S_w , được xác định bởi công thức:

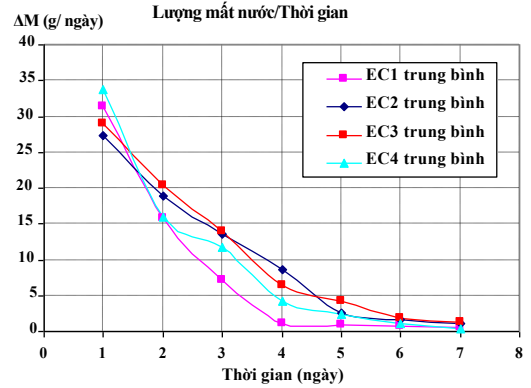
$$S_w = \frac{V_w}{V_v} \quad (4)$$

$$V_v = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{\rho_w} \quad (5)$$

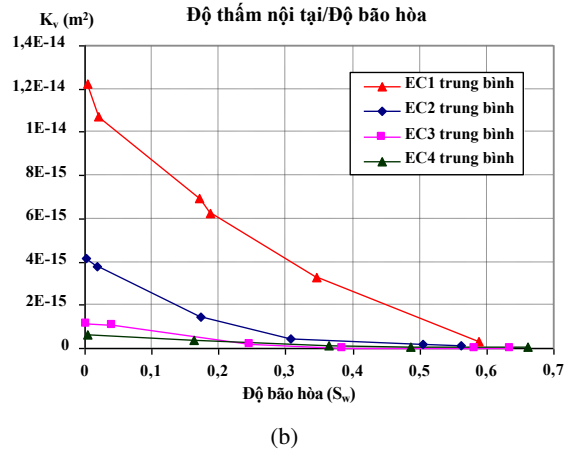
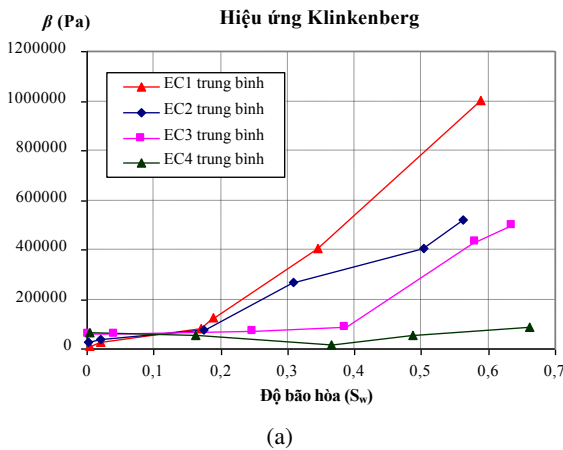
trong đó V_w là thể tích nước ở trạng thái bất kỳ (cm^3); V_v là thể tích rỗng của vật liệu (cm^3); M_{sat} là khối lượng mẫu khi bão hòa nước (g) và M_{sec} là khối lượng mẫu khi sấy khô (g) và ρ_w là khối lượng riêng của nước (g/cm^3).

Áp dụng công thức (4) cho các mẫu đo, ta nhận thấy độ bão hòa ban đầu của các mẫu dao động từ 70% - 85%.

Nhìn chung, ta chỉ có thể đo được độ thấm khí khi độ bão hòa dưới 80%. Trên ngưỡng 80%, chỉ một lượng rất nhỏ khí trơ có thể đi xuyên qua mẫu. Căn cứ vào sự biến thiên của hệ số Klinkenberg theo độ bão hòa (Hình 8(a)), khi mẫu đã khô hoàn toàn, sai lệch giữa các giá trị tương đối thấp. Điều này được lý giải bởi sự giảm tác dụng của dịch chuyển trượt so với dịch chuyển nhót. Trong khi đó do có sự thay đổi mạnh mẽ trong cấu trúc rỗng của vật liệu, quan sát thấy trên Hình 8(b), độ thấm nội tại ở trạng thái khô có sự biến thiên khá lớn giữa các mẫu đo.



Hình 7. Biến thiên của độ mất nước theo thời gian của 4 tổ mẫu



Hình 8. Biến thiên theo độ bão hòa của: a) Hệ số Klinkenberg β ; b) Độ thấm nội tại K_v

3. Các lý thuyết mô phỏng trong tính toán độ thấm nội tại

Chất lỏng trong lỗ rỗng thường tồn tại dưới dạng tổ hợp của nước và một lượng nhỏ chất lỏng không hòa tan. Độ thấm nội tại ở một trạng thái bão hòa xác định $K_v(S_w)$ phụ thuộc vào độ thấm ở trạng thái không có nước K_v và ảnh hưởng của sự có mặt pha lỏng đối với pha khí. Độ thấm ở trạng thái chưa bão hòa của vật liệu trên cơ sở xi măng được xác định bởi công thức sau:

$$K_v(S_e) = K_v \cdot K_r(S_e) \quad (6)$$

trong đó S_e là độ bão hòa hiệu dụng; $K_v(S_e)$ là độ thấm nội tại theo độ bão hòa hiệu dụng (m^2); K_v là độ thấm nội tại ở trạng thái khô tuyệt đối (m^2); $K_r(S_e)$ là độ thấm tương đối với khí trơ theo độ bão hòa hiệu dụng.

Độ bão hòa hiệu dụng được xác định bởi mối quan hệ như sau:

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{S_s - S_r} \quad (7)$$

trong đó S_s là độ bão hòa ở trạng thái bão hòa ($S_s \approx 1$); S_w là độ bão hòa ở trạng thái bất kỳ; S_r là độ bão hòa ở trạng thái khô ($S_r \approx 0$). Để đơn giản hóa, trong quá trình tính toán, ta có thể lấy xấp xỉ như sau: $S_e \approx S_w$.

Vấn đề đặt ra làm sao xác định được độ thấm tương đối tương ứng với mỗi giá trị của độ bão hòa. Hai mô hình được ứng dụng nhiều nhất để xác định độ ẩm tương đối là mô hình của Burdine [8] và của Mualem [9]. Hai mô hình này khác nhau cơ bản ở quan điểm về cấu trúc lỗ rỗng. Trong mô hình của mình, Burdine đã mô hình hóa hệ thống lỗ rỗng như một nhóm các ống mao dẫn song song với nhiều đường kính khác nhau. Mô hình của Mualem thì phức tạp hơn khi xét đến sự tương tác giữa các kênh lỗ rỗng. Đối với vật liệu bê tông nói chung, mô hình của Mualem thường được ưu tiên sử dụng hơn trong tính toán độ thấm. Tuy nhiên mỗi mô hình đều có những ưu nhược điểm, việc chọn lựa mô hình tính cần hết sức chú ý sao cho phù hợp.

3.1. Mô hình Brooks-Corey

Corey [10] đã kết hợp mối quan hệ giữa áp suất và độ bão hòa do Brooks-Corey thiết lập [11] với mô hình của Burdine để đưa ra công thức như sau:

$$K_r(S_w) = (1 - S_w)^2 \left(1 - S_w^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right) \quad (8)$$

trong đó λ là chỉ số phân bố kích thước lỗ rỗng Brooks-Corey.

Nghiên cứu này đã chỉ ra rằng chỉ số phân bố của kích thước lỗ rỗng λ trong mô hình áp suất mao dẫn của Brooks-Corey đặc trưng cho tính không đồng nhất của môi trường rỗng: chỉ số phân bố kích thước lỗ rỗng càng lớn, môi trường rỗng càng đồng nhất.

Trong công thức (8), khi giá trị của λ tiến tới 0, ta có $K_r(S_w) = (1 - S_w)^2$. Trái lại, khi giá trị của λ tiến tới vô cùng, ta có $K_r(S_w) = (1 - S_w)^3$. Ở trường hợp này, đường cong có xu hướng giảm nhanh hơn so với trường hợp trước. Từ đây ta có thể rút ra nhận định: Khi giá trị của λ càng lớn, với môi trường rỗng có tính đồng nhất cao, độ thấm nội tại sẽ có xu hướng giảm mạnh hơn khi tăng lượng nước tự do trong mẫu.

3.2. Mô hình Van Genuchten-Mualem

Mualem [9] đã đưa ra mô hình mô phỏng dựa trên giả thiết những lỗ rỗng kết nối với nhau theo chiều dài tỉ lệ tương ứng với bán kính lỗ rỗng. Mô hình này cũng giả thiết rằng định luật Poiseuille áp dụng được cho từng lỗ rỗng thành phần. Với mỗi trạng thái bão hòa xác định, sự nghèo nàn của hệ thống lỗ rỗng, thông số biểu diễn sự tương tác giữa các lỗ rỗng có đường kính khác nhau, có thể diễn giải bởi một hàm số mũ của độ bão hòa:

$$K_r(S_w) = (1 - S_w)^{\frac{1}{p}} \left(1 - S_w^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (9)$$

trong đó m là thông số thực nghiệm; p là thông số hàm mũ. Thông số m được lấy từ đường cong biểu diễn mối quan hệ giữa áp suất mao dẫn và độ bão hòa nước.

Van Genuchten [12], trên cơ sở lý thuyết được xây dựng bởi Mualem, đã xác định được những hệ số này, đồng thời chỉ ra miền ứng dụng trong vật liệu có nguồn gốc từ xi măng. Sau khi so sánh kết quả thí nghiệm trên 45 loại xi măng đất khác nhau, giá trị của hàm mũ p dao động trong khoảng $[0,18; 2]$.

4. Kết quả mô phỏng thu được

Trong thí nghiệm đo độ thấm nội tại, các giá trị đo khả tín nhất là ở trạng thái được đánh giá là “khô tuyệt đối” khi không có sự tham gia của nước. Ở trạng thái ẩm khi phun khí qua môi trường, nước sẽ hấp thụ một lượng khí nhất định tạo nên sai số của phép đo. Sai số này càng lớn khi môi trường có độ rỗng cao, tính kết nối giữa các lỗ rỗng lớn. Do vậy trong quá trình mô phỏng, các mô hình đều phải lấy giá trị ở trạng thái khô làm cơ sở để thiết lập đường cong quan hệ.

Với mỗi giá trị xác định của độ bão hòa, bằng thực nghiệm ta thu được một giá trị của độ thấm nội tại K_v tương ứng. So sánh sai số tương đối giữa giá trị này và giá trị mô phỏng, ta có thể kết luận được mức độ phù hợp của từng phương pháp với loại vật liệu mà ta nghiên cứu.

Bảng 2. Các tham số của hai phương pháp mô phỏng được tối ưu hóa trên 16 mẫu đo

Tên mẫu	Trạng thái sấy khô	Brooks-Corey	Van Genuchten-Mualem	
	K_v (m^2)	λ	p	m
EC1-1	3,63E-15	0,01	0,6	0,10
EC1-2	6,08E-15	0,01	0,4	0,11
EC1-3	4,52E-14	0,01	0,6	0,13
EC1-4	2,93E-14	0,01	1,4	0,13
EC2-1	1,24E-14	0,01	0,8	0,13
EC2-2	3,89E-15	2,92	0,3	0,15
EC2-3	2,33E-14	0,01	0,6	0,12
EC2-4	4,36E-14	3,6	0,5	0,13
EC3-1	3,84E-15	10000	0,3	0,15
EC3-2	1,26E-14	0,01	0,6	0,10
EC3-3	2,87E-14	0,01	1,4	0,10
EC3-4	8,35E-15	10000	0,7	0,97
EC4-1	1,16E-15	10000	0,3	1,30
EC4-2	1,22E-14	10000	0,2	0,13
EC4-3	5,71E-15	1,8	0,4	0,14
EC4-4	9,79E-15	0,01	1,0	0,14
Max	4,52E-14	10000	1,40	1,30
Min	1,16E-15	0,01	0,23	0,10
Trung bình	1,56E-14	2501	0,64	0,25
Độ lệch chuẩn	1,37E-14	4330	0,35	0,34

4.1. Mô hình Brooks-Corey

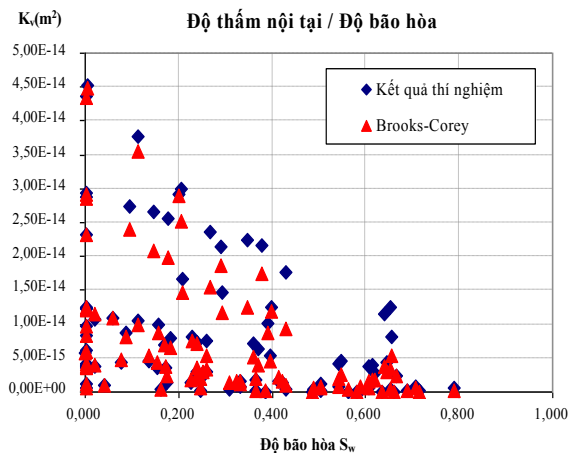
Theo Kewen Li [13], giá trị của chỉ số λ dao động trong khoảng $[0,3; 1,9]$. Tuy nhiên đối với các mẫu xem xét, ta nhận thấy khi chỉ số λ nằm ngoài khoảng $[10^{-2}, 10^4]$ (Bảng 2), giá trị của độ thấm nội tại gần như không thay đổi rõ rệt. Mô hình gần như chỉ mô phỏng tốt đối với những mẫu đo có giá trị biến thiên của độ thấm nội tại không quá lớn.

4.2. Mô hình Van Genuchten-Mualem

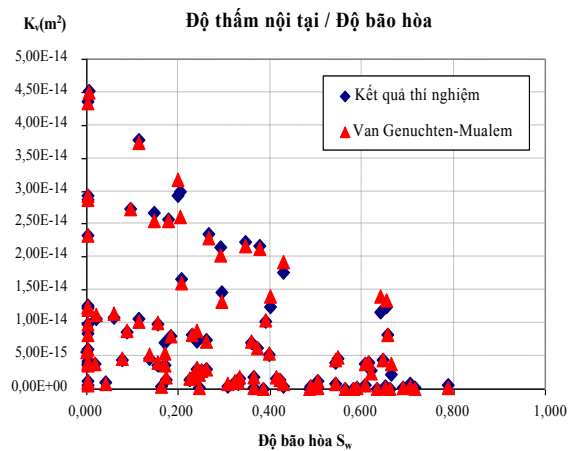
Trong biểu thức (9), cấu trúc vi mô của vật liệu có ảnh hưởng rất lớn đến giá trị của thông số p . Điều này có thể được giải thích bởi sự khác biệt trong cấu trúc vi mô của bê tông và đất, được đặc trưng bởi độ rỗng, sự phân bố của hệ thống lỗ rỗng, sự ngoằn ngoèo, tính kết nối và độ nhám của thành các lỗ rỗng.

Giá trị của p được đưa ra bởi J. Verdier [14], dao động trong khoảng $[0,18; 2,0]$ đối với bê tông là một mốc so sánh rất hữu ích. Ta có thể căn cứ vào giá trị này để mô phỏng sát nhất có thể các giá trị của độ thấm nội tại đo được thông qua thực nghiệm.

Với những giá trị của p trong khoảng $[0,23; 1,4]$, thông số m trong khoảng $[0,1; 1,3]$ (Bảng 2), những giá trị mô phỏng của mô hình Van Genuchten-Mualem gần như trùng khớp với các giá trị đo được bằng thực nghiệm.



Hình 9. So sánh kết quả thí nghiệm trên 16 mẫu đo và mô phỏng theo Brooks-Corey



Hình 10. So sánh kết quả thí nghiệm trên 16 mẫu đo và mô phỏng theo Van Genuchten-Mualem

5. Kết luận chung

Thông qua việc đo độ thấm khí trên các mẫu ở nhiều trạng thái độ ẩm khác nhau, ta có thể xác định được độ thấm nội tại tương ứng, đại lượng chỉ phụ thuộc vào tính chất của vật liệu mà không phụ vào đặc tính của chất lưu thấm qua nó. Đây là cơ sở dữ liệu quan trọng cho phép ta tiến hành các bước mô phỏng tiếp theo.

Đối với mô hình Brooks-Corey, mặc dù giá trị của λ sử dụng vượt khoảng cơ sở lý thuyết nhưng trong nhiều trường hợp, tại một vài giá trị sai số mô phỏng lên đến 50%. Trái lại trong trường hợp của Van Genuchten-Mualem, sai số tương đối luôn dưới 10%, giới hạn chấp nhận được trong công tác thực nghiệm. Về mặt toán học, mô hình Van Genuchten-Mualem linh hoạt hơn do chứa 2 tham

số, giá trị của p dao động trong miền giá trị cơ sở lý thuyết được chỉ ra bởi các công trình nghiên cứu trước đây.

Đối chiếu các giá trị tính toán theo mô hình của Van Genuchten-Mualem và Brooks-Corey với các kết quả thí nghiệm cho phép thiết lập nên miền xác định của các tham số có liên quan. Dựa trên cơ sở các thông số này, có thể dự đoán được (thông qua nội suy hoặc ngoại suy) những giá trị trung gian của độ thấm nội tại ở những trạng thái khác nhau của độ bão hòa mà khó có thể xác định bằng phương pháp thực nghiệm.

Đối với loại vật liệu được nghiên cứu, mô hình Van Genuchten-Mualem tỏ ra hiệu quả và thích hợp hơn so với mô hình Brooks-Corey. Điều này có thể được lý giải bởi giả thiết về cấu trúc vi mô của vật liệu, đặc biệt là vai trò hấp thụ và truyền chất của hệ thống lỗ rỗng của hai mô hình khác nhau.

Tài liệu tham khảo

- [1] Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de dijon*. Victor Dalmont, Paris.
- [2] Picandet, V. (2001). *Influence d'un endomagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons*. These de Doctorat.
- [3] Klinkenberg, L. G. (1941). *The permeability of porous media to liquids and gases*. Drill. Prod. Pract. API 200–213.
- [4] Kollek, J. J. (1989). [The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method—a recommendation](#). *Materials and Structures*, 22(3):225–230.
- [5] Cassanas, M. N. (2005). *Etude expérimentale d'injection de coulis de ciment dans un milieu granulaire. Perméabilité au gaz*. Rapport de stage, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GéM), Ecole centrale de Nantes.
- [6] Bouasker, M. (2007-2008). *Etude de propagation de coulis dans des sols injectés, mesure de perméabilité*. Mémoire de DEA Génie Civil (Eau, environnement et génie côtier), Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GéM), Ecole centrale de Nantes.
- [7] Lion, M., Skoczylas, F., Lafhaj, Z., Sersar, M. (2005). [Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature](#). *Cement and Concrete Research*, 35(10):1937–1942.
- [8] Burdine, N. T. (1953). [Relative permeability calculations from pore size distribution data](#). *Journal of Petroleum Technology*, 5(3):71–78.
- [9] Mualem, Y. (1976). [A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media](#). *Water Resources Research*, 12(3):513–522.
- [10] Corey, A. T. (1994). *Mechanics of immiscible fluids in porous media*. Water Resources Publication.
- [11] Brooks, R. H., Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Pap. 3, Colo. State Univ., Fort Collins.
- [12] Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5):892–898.
- [13] Kewen, L. (2004). *Theoretical development of the Brooks-Corey capillary pressure model from fractal modeling of porous media*. Fourteenth Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
- [14] Verdier, J., Carcasses, M., Ollivier, J. P. (2002). Modelling of a gas flow measurement: Application to nuclear containment vessels. *Cement and Concrete Research*, 32(8):1331–1340.