

ỨNG DỤNG LÝ THUYẾT MỜ THIẾT LẬP MỐI QUAN HỆ GIỮA NGUỖNG CLORUA VÀ CÁC NHÂN TỐ KHÁC ẢNH HƯỞNG ĐẾN ẪN MÒN CỐT THÉP TRONG BÊ TÔNG CÁC CÔNG TRÌNH VEN BIỂN

APPLICATION OF FUZZY THEORY TO THE ESTABLISHMENT OF RELATIONSHIPS BETWEEN CHLORIDE THRESHOLD AND OTHER FACTORS AFFECTING CORROSION IN REINFORCED COASTAL CONCRETE STRUCTURES

Nguyễn Thị Kim Loan, Lê Khánh Toàn

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; Email: loannguyen03@gmail.com

Tóm tắt: Một trong những nguyên nhân gây ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép, làm giảm tuổi thọ của các công trình ven biển là hiện tượng xâm thực clorua. Cơ chế ăn mòn clorua, mức độ thẩm thấu của ion clorua và các nhân tố ảnh hưởng đến độ thẩm thấu ion clorua vào trong bê tông đã được nghiên cứu khá đầy đủ. Trong môi trường ăn mòn, khi nồng độ ion clorua đạt đến một "ngưỡng" nhất định sẽ gây ăn mòn cốt thép. Ngưỡng nồng độ ion clorua phụ thuộc vào nhiều nhân tố khác nhau trong môi trường. Nghiên cứu ngưỡng ăn mòn nồng độ ion clorua, thiết lập mối quan hệ giữa ngưỡng này với các nhân tố khác nhau trong môi trường, dựa trên lý thuyết logic mờ, là mục tiêu mà nghiên cứu trong bài báo này hướng tới.

Từ khóa: ăn mòn; công trình biển; nồng độ ion clorua; ngưỡng; logic mờ; nhân tố ảnh hưởng.

1. Đặt vấn đề

Bê tông cốt thép (BTCT) là loại vật liệu xây dựng được sử dụng phổ biến nhất trên thế giới. Xâm thực bê tông và cốt thép là một trong những nguyên nhân chính gây phá hủy kết cấu công trình.

Trong nhiều nguyên nhân gây xâm thực, xâm thực cốt thép trong môi trường có chứa ion Clorua là một trong những nguyên nhân chính làm hư hỏng, giảm tuổi thọ và dẫn đến phá hủy các công trình BTCT khu vực ven biển.

Quá trình ăn mòn do ion clorua bắt đầu xảy ra khi nồng độ của ion clorua trong môi trường vượt qua một "ngưỡng" nhất định. Đã có nhiều những công trình nghiên cứu liên quan đến "ngưỡng" này. Một số tác giả dùng phương pháp phân tích ngẫu nhiên để dự đoán nồng độ ion ở "ngưỡng" gây ra ăn mòn cốt thép [1]. Những tác giả khác lại dựa vào lý thuyết thống kê để đưa ra một cách tiếp cận ngưỡng này dựa vào những giá trị ngưỡng thực tế [2, 3, 4].

Việt Nam có khí hậu nhiệt đới nóng và ẩm, các công trình kết cấu BTCT xây dựng ở vùng ven biển phải chịu tác động xâm thực mạnh của môi trường, trong đó phổ biến và nguy hại nhất là hiện tượng xâm thực clorua gây ăn mòn và phá hủy cốt thép. Nghiên cứu các nhân tố ảnh hưởng đến "ngưỡng" ăn mòn ion clorua và mối quan hệ giữa ngưỡng này với các nhân tố khác trong môi trường sẽ làm cơ sở để đề ra những giải pháp phù hợp nâng cao độ bền công trình BTCT.

2. Cơ chế ăn mòn clorua

Trong môi trường xâm thực mạnh, khi có mặt ion clorua, do chênh lệch nồng độ, nên ion này sẽ khuếch

Abstract: One of the causes of steel corrosion in reinforced concrete structure, shortening the service life of coastal buildings is the chloride penetration phenomenon. The mechanism of chloride corrosion, the degree of penetration of chloride ions and the factors influencing to chloride ion penetration into concrete have been studied quite adequately. In the corrosive environment, when the concentration of chloride ion reaches a certain "threshold", it will lead to the corrosion of steel reinforcement. Threshold concentration of chloride ion depends on many different factors in the environment. Researching chloride corrosion threshold and establishing the relationship between this threshold with the different factors in the environment, based on fuzzy logic theory, are the objectives of this article.

Key words: steel corrosion; coastal buildings; chloride ion penetration; threshold; fuzzy logic theory.

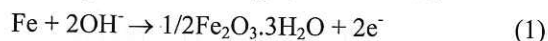
tán qua bề mặt bê tông (BT) và tiến dần đến cốt thép. Tốc độ khuếch tán phụ thuộc vào nhiều yếu tố như nhiệt độ, độ ẩm, hàm lượng ion clorua trong môi trường, ..., nhưng chủ yếu là phụ thuộc vào chất lượng của BT.

Ban đầu, BT là môi trường kiềm mạnh với độ pH khoảng từ 13 đến 13,8. Môi trường kiềm này tạo điều kiện hình thành lớp màng oxit thụ động bảo vệ trên bề mặt cốt thép gồm các oxit ngậm nước của Fe^{2+} và Fe^{3+} .

Khi xuất hiện ion clorua tại bề mặt cốt thép, một số ion sẽ tìm đến những khu vực có khuyết tật trên lớp màng thụ động, đây là khu vực không được bảo vệ và rất dễ bị phá hoại. Do có bán kính ion rất nhỏ (0,181nm), nên ion clorua dễ dàng xâm nhập qua các vị trí khuyết tật của lớp màng thụ động, tham gia phản ứng trực tiếp với sắt tạo thành dạng phức sắt – clorua hoà tan [5].

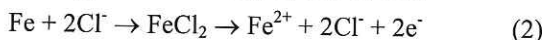
Quá trình ăn mòn cốt thép trong BT là quá trình điện hóa bao gồm sự dịch chuyển điện tích và một vài phản ứng hóa học. Trong môi trường có ion Cl^- , OH^- , oxy, các phản ứng ở catốt và anốt có thể được biểu diễn như sau [6]:

* Phản ứng ở anốt khi nồng độ ion OH^- cao:

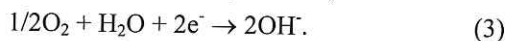


Oxit sắt ngậm nước (gỉ) không hòa tan trong môi trường kiềm, tạo thành lớp màng bảo vệ trên bề mặt cốt thép.

* Phản ứng ở anốt khi nồng độ ion Cl^- cao:

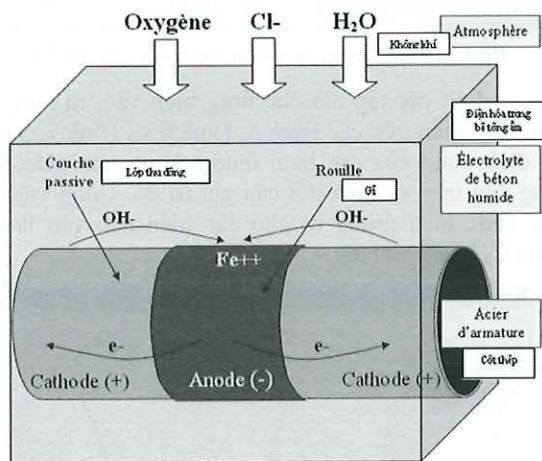


Phản ứng ở catốt (khi có oxy và nước):



Nồng độ ion clorua cao kết hợp với oxy gây ăn mòn mạnh cốt thép, trong khi nồng độ ion OH^- cao làm chậm quá trình ăn mòn. Khi tỷ lệ nồng độ ion Cl^-/OH^- vượt quá giá trị ngưỡng giới hạn, xác suất xảy ra phản ứng ăn mòn anốt (2) sẽ lớn hơn xác suất hình thành màng bảo vệ anốt bởi phản ứng (1), sự ăn mòn cốt thép bắt đầu. Khi một điểm trên cốt thép bị ăn mòn, những nguyên tử sắt mới sẽ bị lộ ra và lại bị ion clorua tiếp tục tấn công, do đó sự ăn mòn lại tiếp tục phát triển và chỉ dừng lại khi một lớp màng oxit bảo vệ mới được hình thành trở lại [5].

Trong môi trường xâm thực, hàm lượng ion clorua luôn có xu hướng tăng lên, do đó sự ăn mòn tiếp tục xảy ra và phát triển liên tục.



Hình 1. Ăn mòn trong cốt thép do ion clorua [7]

3. Nghiên cứu về giá trị ngưỡng ion clorua và các nhân tố ảnh hưởng

Sự ăn mòn xảy ra khi hàm lượng ion clorua đạt đến một giá trị quan trọng. Giá trị này được biểu diễn theo tỷ lệ nồng độ ion Cl^-/OH^- . Trong BT, tỷ lệ $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-] = 0,6$, tương ứng với hàm lượng clorua 0,4% khối lượng xi măng [8]. Hàm lượng clorua được gọi là "ngưỡng ăn mòn C_{th} ".

Ở Việt Nam, ngưỡng này thường được quy định: nồng độ ion clorua không quá 0,2% đến 0,4% khối lượng xi măng; hay tỷ lệ nồng độ ion Cl^-/OH^- không quá 0,6 [6]. Tuy nhiên, giá trị của ngưỡng này tùy thuộc vào độ pH của BT (thay đổi tùy loại xi măng và cấp phối BT), mức độ hấp thụ vật lý và hóa học ion clorua của BT, sự có mặt của oxy, hơi ẩm và lỗ rỗng tại bề mặt tiếp xúc giữa cốt thép và BT [6].

Giá trị ngưỡng 0,4% khối lượng của xi măng là nồng độ ion clorua tự do. Những ion clorua tự do là những ion đến từ nước biển và thẩm thấu vào trong lớp bao cốt thép bởi những khe hở của vật liệu (lỗ rỗng, vết nứt). Clo trong BT tồn tại dưới ba hình thức:

- Clorua tự do: Ion clorua được hòa tan trong nước, nó thẩm thấu vào trong lớp bao cốt thép bởi những khe hở của vật liệu (lỗ rỗng, vết nứt).
- Clorua liên kết: Ion clorua ràng buộc ban đầu có trong BT. Nó có nguồn gốc hóa học trong các thành phần khác nhau của cốt liệu, xi măng, nước, phụ gia.
- Các ion clorua tự do và liên kết từ muối hòa tan

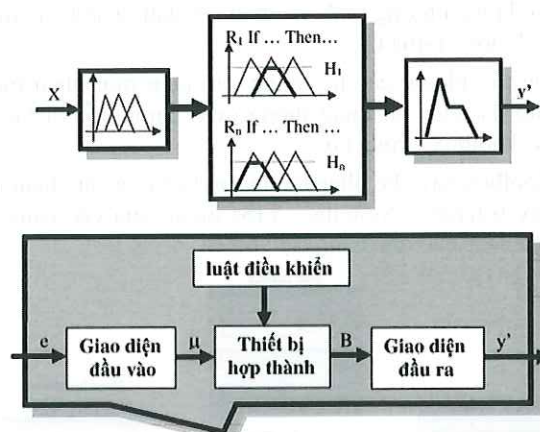
trong các vật liệu bê tông. Tổng của clorua tự do và liên kết là hàm lượng clorua tổng thể trong BT (clorua tổng).

Giá trị ngưỡng nồng độ ion clorua được thể hiện bởi Clorua tổng, Clorua tự do và tỷ lệ giữa nồng độ $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$. Vì thế, trong rất nhiều công trình nghiên cứu, giá trị của ngưỡng nồng độ này thể hiện khác nhau và có giá trị rất đa dạng (Bảng 1).

Việc xác định chính xác giá trị của ngưỡng nồng độ ion clorua gây ăn mòn cốt thép gặp nhiều khó khăn vì giá trị này phụ thuộc vào nhiều thông số. Liên quan đến BT: Độ pH của dung dịch hòa tan, độ ẩm, nhiệt độ, hàm lượng C_3A ...; liên quan đến cốt thép: thành phần, tạp chất, độ nhám của bề mặt...

3.1. Ứng dụng lý thuyết tập mờ trên Matlab để thiết lập mối liên hệ giữa ngưỡng nồng độ ion clorua và các nhân tố khác

3.1.1. Sơ đồ của một điều khiển mờ



Hình 2. Sơ đồ của một điều khiển mờ [9]

+ Giao diện đầu vào: Giá trị thực tế của mỗi biến đầu vào và chuyển các giá trị thực tế các biến không mờ từ chế độ bên ngoài của tập mờ. Sự lựa chọn hàm thuộc phụ thuộc vào sự tin tưởng.

Ngược lại, nếu đo lường của biến là không chắc chắn, tập mờ phải được thể hiện bởi một hàm thuộc không chính xác. Ví dụ, cơ sở của tam giác là một chức năng của các biến đo lường tương đối.

+ Thiết bị hợp thành: Sự triển khai quy luật hợp thành R.

+ Luật điều khiển: Ứng dụng quy tắc "nếu-thì". Dưới đây giới thiệu hai mô hình mờ hay được sử dụng là mô hình Madami hoặc mô hình Tagaki-Sugeno.

a. Mô hình mờ Mamdani [10]

Mô hình Mamdani cho phép mô tả ngôn ngữ của hệ thống với một quy luật mờ có dạng:

Nếu $x_1 = A_1$ và $x_2 = A_2$ và ... và $x_n = A_n$

Thì $y_1 = B_1$ và $y_2 = B_2$ và ... và $y_m = B_m$

trong đó x_i và y_j là tương ứng các biến đầu vào và đầu ra ngôn ngữ, A_i và B_j là nhóm ngôn ngữ mờ (tập mờ).

Ưu điểm của mô hình: Đơn giản, dễ thực hiện nhưng khả năng mô tả hệ thống không tốt.

b. Mô hình mờ Tagaki-Sugeno (TS) [10]

Mô hình là một hệ thống đầu vào và một đầu ra, bao

gồm một nguyên tắc cơ bản có dạng:

Nếu $x_1 = A_1 i_1$ và $x_2 = A_2 i_2$ và ... và $x_r = A_r i_r$

Thì $y = f_i(x_1, x_2, \dots, x_r)$

trong đó $x_1, x_2, \dots, x_r$ là các biến đầu vào của mô hình mờ và f_i là một hàm chức năng của các biến đầu vào. Các f_i thường là các hàm tuyến tính.

Ưu điểm của mô hình: Có thể được sử dụng để mô hình bất kỳ hệ thống suy luận nào mà trong đó các hàm thuộc đầu ra là không đổi hoặc tuyến tính.

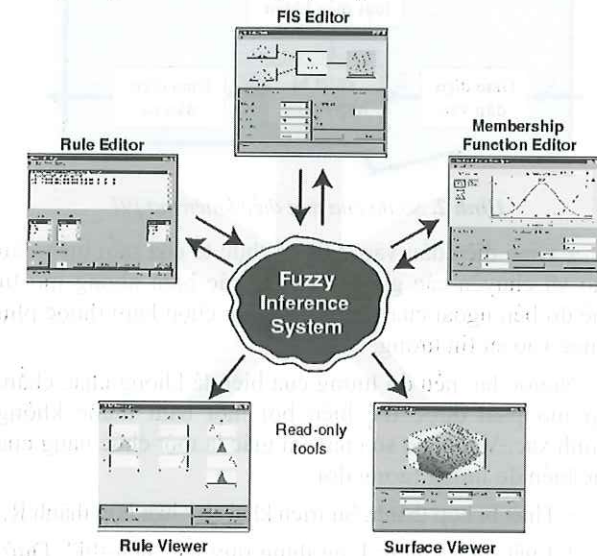
+ Giao diện đầu ra: Khâu giải mờ và các khâu giao diện trực tiếp với đối tượng.

3.1.2. Ứng dụng để thiết lập mối liên hệ giữa ngưỡng nồng độ ion clorua và các nhân tố khác

Mục tiêu của nghiên cứu là tìm ra mối quan hệ giữa nhiệt độ và hàm lượng C_3A với nồng độ của ion clorua trong giai đoạn bắt đầu ăn mòn. Đầu vào trong trường hợp này sẽ là hàm lượng C_3A và nhiệt độ, đầu ra sẽ là ngưỡng nồng độ ion clorua C_{th} .

Để mô phỏng các hệ thống suy luận mờ, phần mềm Matlab đã được sử dụng thông qua "Simulink và Fuzzy Logic Toolbox" trong nó.

Toolbox này cho phép tạo ra các hệ thống suy luận mờ (Fuzzy Inference Systems - FIS) thông qua các công cụ đồ họa hoặc các tính năng trực tuyến.

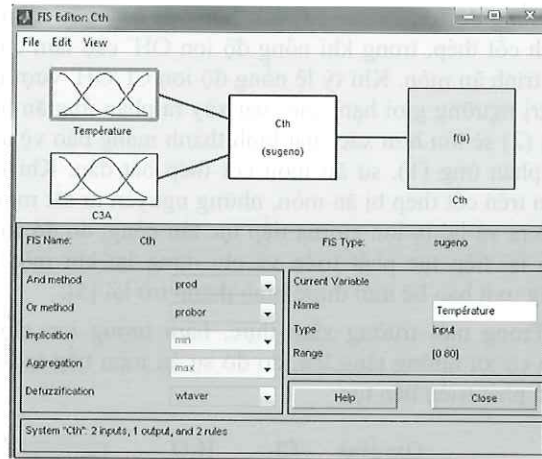


Hình 3. Hộp công cụ MATLAB Fuzzy Logic [11]

Dữ liệu đầu vào là nồng độ ion clorua phụ thuộc vào hàm lượng C_3A và nhiệt độ được tập hợp từ các kết quả nghiên cứu trước đây [12] (Bảng 1). Định nghĩa biến đầu vào, ra được biểu diễn trên Hình 4.

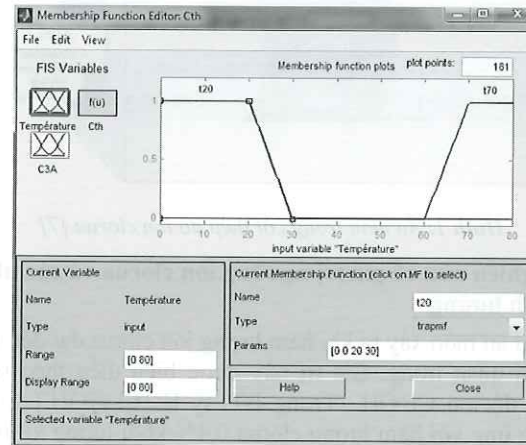
Bảng 1. Dữ liệu đầu vào của ngưỡng nồng độ ion clorua tương ứng với nhiệt độ và hàm lượng C_3A

$C_3A(\%)$	$T=20^\circ C$	$T=70^\circ C$
2,43	0,35	0,04
7,59	0,62	0,09
14	1	0,19



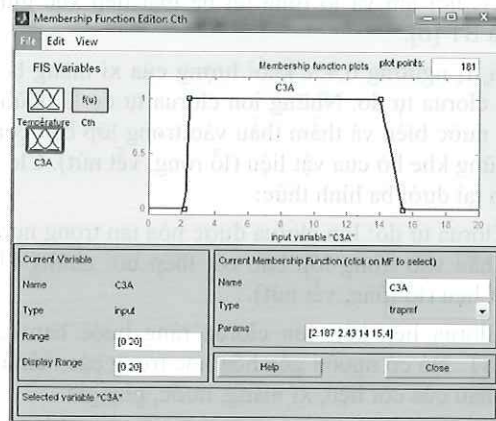
Hình 4. Định nghĩa biến đầu vào, ra trong Matlab

Xác định các tập mờ cho từng biến vào, ra (suy mờ) được biểu diễn trên các Hình 5, Hình 6 và Hình 7. Sau đó xác định dạng của các hàm thuộc: Hình tam giác, hình thang dựa trên sự biến đổi của giá trị đó. Công việc này được thực hiện tương tự cho các biến đầu vào là hàm lượng C_3A và nhiệt độ.

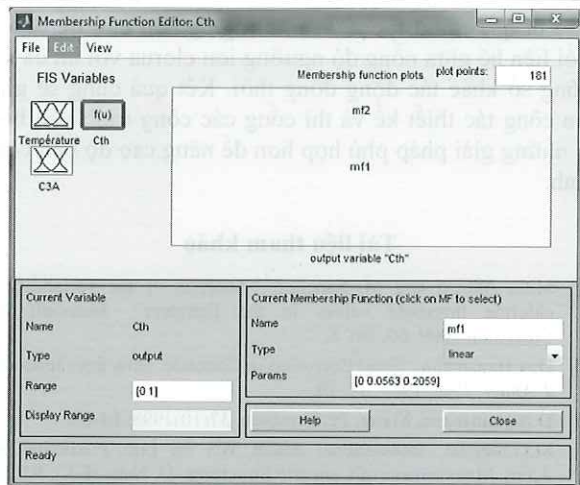
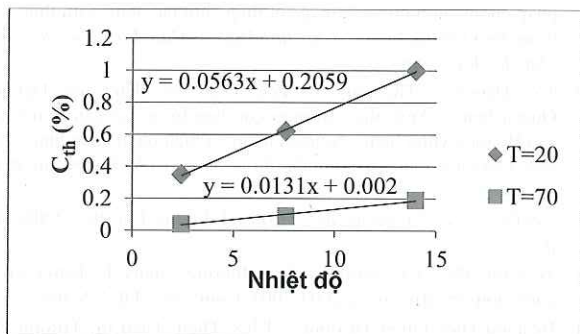


Hình 5. Suy mờ cho biến đầu vào là nhiệt độ

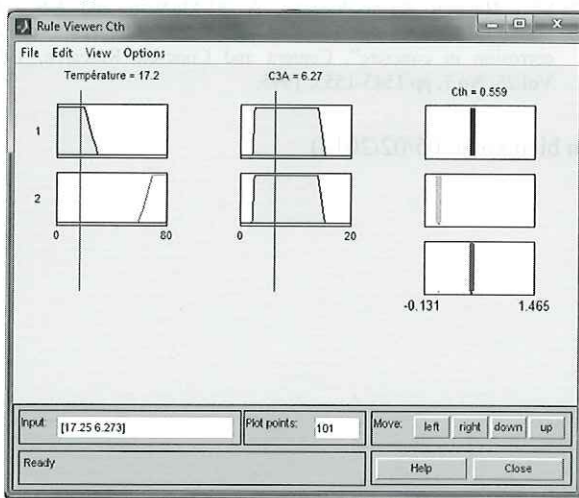
Xác định các tập mờ cho biến đầu ra: Xác định các hàm thuộc của biến đầu ra C_{th} . Hệ thống suy luận mờ loại Sugeno được lựa chọn sử dụng. Hình 8 cho thấy mối quan hệ giữa nhiệt độ và C_{th} (số liệu lấy từ Bảng 1). Vì số lượng dữ liệu còn mỏng, có thể xem như mối quan hệ tuyến tính giữa hai biến.



Hình 6. Suy mờ cho biến đầu vào là hàm lượng C_3A

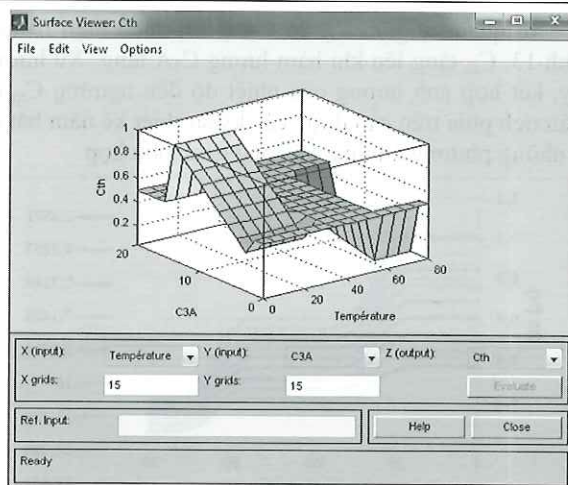
Hình 7. Suy mờ cho biến đầu ra C_{th} Hình 8. Quan hệ giữa C_{th} và nhiệt độ theo hàm lượng C_3A

Qui luật hợp thành được xây dựng dựa vào luật liên kết đầu vào và đầu ra của dữ liệu, được thực hiện trên "Rule Editor" của Matlab. Hình 9 cho thấy sự tham gia của từng quy tắc theo thứ tự, sau đó nó sẽ được tính trung bình cho giá trị đầu ra.



Hình 9. Quy luật hợp thành

Quan sát sự thay đổi giao diện hiển thị của đầu ra trong hộp công cụ hỗ trợ "Surface Viewer" của Matlab trên Hình 10, kết quả của hệ thống suy luận mờ cho chúng ta giao diện đồ thị phụ thuộc của các tham số: C_{th} , nhiệt độ và hàm lượng của C_3A .

Hình 10. Giao diện biểu diễn mối quan hệ giữa C_{th} và các thông số

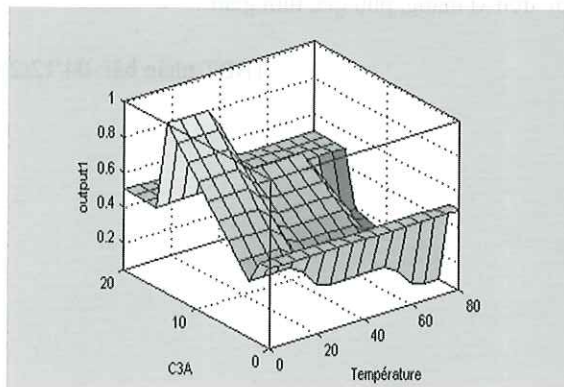
4. Phân tích kết quả

Hình 10 cho thấy: Nồng độ ngưỡng C_{th} tăng lên khi hàm lượng của C_3A tăng; C_{th} giảm khi nhiệt độ tăng. Các kết quả này phù hợp với biến dữ liệu đầu vào trong Bảng 1. Chúng ta cũng có thể nhận thấy trên Hình 10, trong một số vùng mà dữ liệu không có, chẳng hạn, khi nhiệt độ dao động từ 30°C đến 50°C thì các kết quả biểu diễn mối liên hệ giữa C_{th} và các thông số không rõ ràng. Để làm rõ hơn, một giá trị nhiệt độ trung gian $T = 45^\circ\text{C}$ được đề nghị. Giả định rằng, mối quan hệ giữa nhiệt độ và C_{th} là tuyến tính.

Bảng 2. Dữ liệu đầu vào của ngưỡng nồng độ ion clorua có bổ sung giá trị nhiệt độ trung gian ($T=45^\circ\text{C}$)

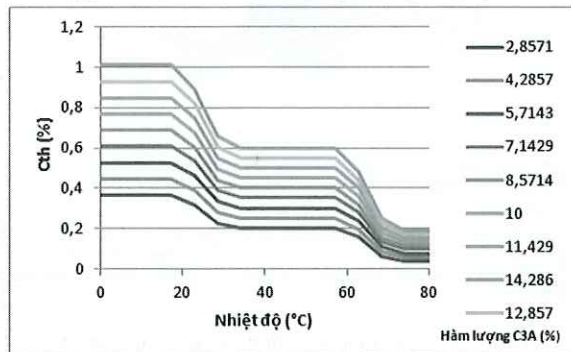
$C_3A(\%)$	$T=20^\circ\text{C}$	$T=45^\circ\text{C}$	$T=70^\circ\text{C}$
2,43	0,35	0,195	0,04
7,59	0,62	0,355	0,09
14	1	0,595	0,19

Kết quả mô phỏng được biểu diễn lại trên Hình 11.

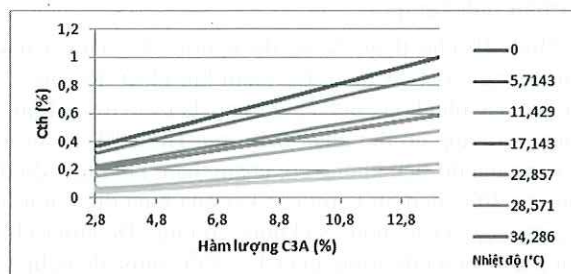
Hình 11. Giao diện biểu diễn mối liên hệ giữa C_{th} và các thông số có bổ sung thêm thông số nhiệt độ $T=45^\circ\text{C}$

Mối quan hệ giữa C_{th} và nhiệt độ có thể nhận thấy rõ trên Hình 12: C_{th} hầu như không đổi trong khoảng nhiệt độ từ 0°C đến 17°C, giá trị này giảm trong khoảng nhiệt độ từ 17°C đến 35°C, Trong khoảng từ 35°C đến 57°C C_{th} cũng hầu như không đổi. Từ 57°C đến 75°C C_{th} giảm, và cuối cùng nó không đổi khi nhiệt độ trên 75°C.

Mối quan hệ giữa C_{th} và C_3A , được thể hiện rõ trên Hình 13, C_{th} tăng lên khi hàm lượng C_3A tăng. Xu hướng này, kết hợp ảnh hưởng của nhiệt độ đến ngưỡng C_{th} đã phân tích phía trên cần được các kỹ sư thiết kế nắm bắt để có những phương án thiết kế công trình phù hợp.



Hình 12. Quan hệ giữa ngưỡng C_{th} và nhiệt độ



Hình 13. Quan hệ giữa ngưỡng C_{th} và hàm lượng C_3A

5. Kết luận

Từ những số liệu rời rạc về ngưỡng nồng độ ion clorua liên quan đến ăn mòn clorua trong bê tông, ứng dụng lý thuyết tập mờ tích hợp trong phần mềm Matlab, nghiên cứu đã thiết lập được mối quan hệ giữa ngưỡng nồng độ ion clorua C_{th} và các thông số nhiệt độ, hàm lượng C_3A . Thực tế, ngưỡng nồng độ ion clorua còn phụ thuộc đồng thời vào nhiều thông số khác có liên quan với nhau như: Độ ẩm, tỉ lệ nước trên xi măng, phụ gia, thời gian...

Kết quả thu được mở ra hướng nghiên cứu tiếp theo: Mối liên hệ giữa nồng độ ngưỡng ion clorua với tất cả các thông số khác tác động đồng thời. Kết quả cũng sẽ giúp cho công tác thiết kế và thi công các công trình ven biển có những giải pháp phù hợp hơn để nâng cao độ bền công trình.

Tài liệu tham khảo

- [1] M.C. Alonso and M. Sanchez, "Analysis of the variability of chloride threshold values in the literature". *Materials and Corrosion* 2009, 60, No. 8.
- [2] D.A Hausmann, "Steel Corrosion in Concrete. How does it occur?" *J. Mater. Prot.* 1967. 37. 19.
- [3] D.A Hausmann, *Mater. Performance*, 37(10)1998: 64-68.
- [4] M.G.Stewart, International Rilem WS on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, D. Naus (Ed.), RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, France, 2001, p.209.
- [5] TS. Nguyễn Thanh Bằng. Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, "Giải pháp chống ăn mòn và bảo vệ cốt thép chịu tác động xâm thực Clo trong môi trường biển", *Tạp chí KH&CN Thủy lợi Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam*.
- [6] Th.S. Đào Ngọc Thế Vinh, TS. Peter Dux, TS. Alan Carse, Đại học Queensland – Australia, Ăn mòn cốt thép trong kết cấu trong kết cấu Bê tông vùng biển - Nguyên nhân và biện pháp khắc phục, *Hội nghị khoa học toàn quốc lần thứ ba về Sự cố và hư hỏng công trình xây dựng*.
- [7] Neville, A.M. *Propriété des bétons*, Éditions Eyrolles 2000, 806 pages.
- [8] Torrenti JM.. *La diffusion des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures*, 2003-2004, Cours S5 – DEA Maise.
- [9] Bộ môn Điều khiển Tự động – Khoa Điện- Điện tử, Trường Đại học Bách khoa - ĐHQG Tp HCM, Lý thuyết điều khiển hiện đại. Chương 1: Công nghệ tính toán mềm (Soft Computing technology).
- [10] J.-S.R.Jang, and Chuen-Tsai Sun and Eiji Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, MATLAB Curriculum Series, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1997 (ISBN 0-13-261066-3).
- [11] <http://www.mathworks.fr/help/toolbox/fuzzy/fp754.html>
- [12] SE. Hussain, Rasheeduzzafar, A. Al-Mu&am, and A.S. Al-Gahtani, "Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete", *Cement and Concrete Research*, 1995, Vol.25, No.7, pp.1543-1555, 1995.

(BBT nhận bài: 04/12/2013, phản biện xong: 05/02/2014)