

NGHIÊN CỨU PHÂN TÍCH ĐỘ TIN CẬY CỦA MỐI GHÉP HÀN SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP XẤP XỈ BẬC NHẤT

Trần Văn Thùy¹

TÓM TẮT

Mối ghép hàn là dạng liên kết quan trọng trong kết cấu cơ khí và xây dựng, song đặc tính làm việc của nó chịu ảnh hưởng lớn từ các yếu tố bất định như tải trọng, cơ tính vật liệu và sai số chế tạo. Các phương pháp thiết kế xác định thường bỏ qua sự biến thiên này, dẫn đến thiết kế quá an toàn hoặc không an toàn. Nghiên cứu này áp dụng phương pháp xấp xỉ bậc nhất (First Order Reliability Method – FORM) để phân tích độ tin cậy mối hàn, nhằm ước lượng xác suất hỏng một cách hiệu quả. Dựa trên mô hình kết cấu thân máy CNC, hàm trạng thái giới hạn được thiết lập theo tiêu chí ứng suất cắt tương đương. Các biến ngẫu nhiên gồm lực tác dụng, giới hạn bền cắt và chiều cao mối hàn. Kết quả phân tích cho thấy chỉ số độ tin cậy $\beta = 3,38$, tương ứng với độ tin cậy $R_{FORM} = 0,99963$. Mô phỏng Monte Carlo với 5×10^6 mẫu cho kết quả gần trùng khớp ($R_{MCS} = 0,9996$). Sai số tương đối của phương pháp FORM so với MCS là 7.5%, chứng minh FORM có độ chính xác cao và chi phí tính toán thấp. Phân tích độ nhạy cho thấy giới hạn bền cắt là tham số chi phối, trong khi kích thước hình học ít ảnh hưởng hơn. Nghiên cứu khẳng định FORM là công cụ hữu hiệu trong phân tích và thiết kế kết cấu hàn theo độ tin cậy.

Từ khóa: Độ tin cậy; mối ghép hàn; FORM; Monte Carlo; phân tích độ nhạy.

1. Tổng quan

Mối ghép hàn là dạng liên kết được sử dụng rộng rãi trong các kết cấu cơ khí, xây dựng, giao thông và năng lượng nhờ ưu điểm bền vững, tiết kiệm vật liệu và dễ chế tạo. Tuy nhiên, độ bền và tuổi thọ của mối hàn chịu ảnh hưởng mạnh từ nhiều yếu tố bất định như tải trọng thay đổi, phân tán cơ tính vật liệu, sai số hình học và khuyết tật công nghệ. Do đó, việc chỉ áp dụng các phương pháp thiết kế xác định truyền thống thường không đủ cơ sở để phản ánh đúng bản chất ngẫu nhiên của quá trình làm việc, có thể dẫn đến thiết kế dư thừa hoặc tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn [1, 2]. So với kết cấu đúc, kết cấu hàn thường nhẹ hơn (giảm 30-50%) và có bố trí hợp lý hơn do hạn chế ứng suất dư. Trong thực tế, xu hướng kết hợp giữa kết cấu hàn và kết cấu đúc ngày càng phổ biến, đặc biệt khi một số bộ phận có hình dạng phức tạp được chế tạo bằng phương pháp đúc, sau đó liên kết với khung thép hàn [3-5].

Trong thực tiễn thiết kế, các mối hàn thường được đánh giá theo phương pháp xác định, dựa vào hệ số an toàn nhằm tránh phá hỏng dưới tải trọng dự kiến. Tuy nhiên, cách tiếp cận này chưa phản ánh đầy đủ ảnh hưởng của các yếu tố ngẫu nhiên như tải trọng biến thiên, sai số chế tạo, khuyết tật hàn hay sự phân tán cơ tính vật liệu. Do đó, nhiều phương pháp phân tích độ tin cậy đã được phát triển nhằm định lượng xác suất hỏng hóc và chỉ số độ tin cậy β của hệ thống. Các phương pháp chính có thể kể đến: phương pháp momen thích hợp (FOSM), phương pháp trường hợp xấu nhất [6-8], phương pháp giảm

chiều (DRM) [9, 10], mô phỏng Monte Carlo (MCS) và các biến thể cải tiến [11-15], phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) [16-18], cũng như phương pháp xấp xỉ bậc nhất (FORM) và bậc hai (SORM) [19, 20]. Trong đó, MCS cho kết quả toàn diện nhưng chi phí tính toán rất lớn, còn FORM được xem là công cụ cân bằng giữa độ chính xác và hiệu quả, đặc biệt hữu ích khi kết hợp với mô phỏng phần tử hữu hạn (FEA).

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về độ tin cậy trong các lĩnh vực kết cấu cơ khí, nhưng việc áp dụng FORM cho phân tích mỗi ghép hàn vẫn còn hạn chế. Do đó, nghiên cứu này tập trung xây dựng mô hình độ tin cậy cho mỗi ghép hàn, trong đó các yếu tố ngẫu nhiên của tải trọng, kích thước hình học và đặc tính cơ học vật liệu được xem xét. Phương pháp FORM được áp dụng để xác định chỉ số độ tin cậy và xác suất hỏng của mối hàn. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng tiến hành phân tích độ nhạy nhằm làm rõ vai trò của từng tham số trong độ tin cậy tổng thể. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở khoa học cho việc cải tiến các phương pháp thiết kế, góp phần nâng cao độ an toàn và tối ưu hóa kết cấu hàn trong thực tiễn.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Khái niệm cơ bản về độ tin cậy

Độ tin cậy (Reliability, R) của một kết cấu hoặc chi tiết máy được định nghĩa là xác suất để hệ thống thực hiện đúng chức năng thiết kế trong một khoảng thời gian xác định, dưới các điều kiện vận hành nhất định. Đối với mỗi ghép hàn, độ tin cậy phản ánh khả năng làm việc an toàn của liên kết trong suốt quá trình chịu tải trọng, bao gồm cả tải tĩnh và tải thay đổi theo thời gian. Cách khác, độ tin cậy được định nghĩa là xác suất của hàm trạng thái giới hạn $g(\mathbf{X}) > 0$, tương ứng với giá trị xác suất các biến ngẫu nhiên $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ nằm trong vùng an toàn, được xác định theo công thức:

$$R = P(g(\mathbf{X}) > 0) = \int_{g(\mathbf{x}) > 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (1)$$

Trong phân tích độ tin cậy, trạng thái hỏng được xác định thông qua hàm trạng thái giới hạn (Limit State Function – LSF):

$$g(\mathbf{X}) = R(\mathbf{X}) - S(\mathbf{X}) \quad (2)$$

Trong đó: $R(\mathbf{X})$ là sức bền hoặc khả năng chịu tải của mối hàn, $S(\mathbf{X})$ là tải trọng hoặc yêu cầu tác động lên mối hàn và \mathbf{X} là vector các biến ngẫu nhiên đặc trưng cho tải trọng, đặc tính vật liệu và kích thước hình học.

Nếu $g(\mathbf{X}) > 0$, mối ghép hàn được coi là an toàn; ngược lại, khi $g(\mathbf{X}) \leq 0$, mối ghép hàn bị hỏng. Do đó, xác suất hỏng (P) được định nghĩa:

$$P = P(g(\mathbf{X}) \leq 0) \quad (3)$$

Để biểu diễn mức độ an toàn của kết cấu, phương pháp độ tin cậy thường sử dụng chỉ số độ tin cậy (Reliability Index) β :

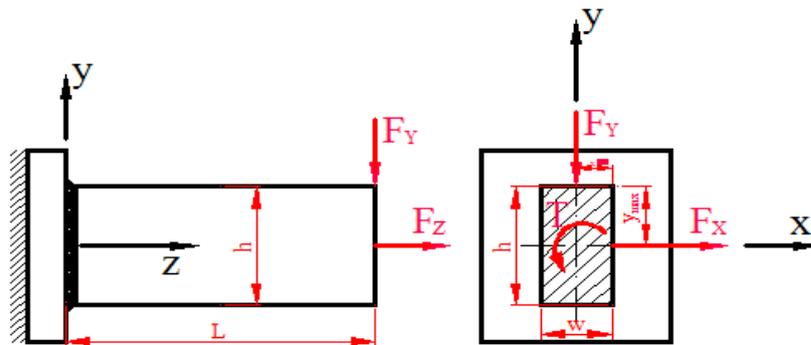
$$\beta = -\Phi^{-1}(P) \quad (4)$$

Trong đó $\Phi^{-1}(\cdot)$ là hàm nghịch đảo của phân phối chuẩn tích lũy. Giá trị β càng lớn, xác suất hỏng càng nhỏ, tức kết cấu có độ an toàn cao hơn.

Các phương pháp phổ biến thường được sử dụng trong việc phân tích độ tin cậy là phương pháp mômen thích hợp, phương pháp xấp xỉ bậc nhất và xấp xỉ bậc hai. Cơ sở của các phương pháp này là làm đơn giản quá trình tính toán thông qua việc đơn giản hoá các công thức dưới dấu tích phân $f_x(\mathbf{x})$ và sử dụng giá trị xấp xỉ hàm trạng thái giới hạn $g(\mathbf{X})$.

2.2. Hàm trạng thái giới hạn cho mối ghép hàn

Xét mối hàn góc chịu lực phức tạp như Hình 1. Mỗi ghép hàn chịu lực kéo F_z , Lực cắt F_x, F_y , Momen uốn M_x, M_y và Momen xoắn T .



Hình 1. Mối hàn góc chịu lực phức tạp

Mối hàn góc được tính toán theo ứng suất cắt trên mặt cắt có diện tích nhỏ nhất (mặt cắt nguy hiểm), nằm trên mặt phẳng phân giác góc vuông của mặt cắt ngang mối hàn. Để xác định độ tin cậy R của mối ghép hàn, đầu tiên ta xác định hàm trạng thái giới hạn theo ứng suất cắt giới hạn trong mặt cắt nguy hiểm của mối hàn:

$$g(X) = \tau_{\text{lim}} - \tau_{\text{td}} \quad (5)$$

Trong đó: τ_{lim} là ứng suất cắt giới hạn, MPa, τ_{td} là ứng suất cắt tương đương lớn nhất sinh ra trong mối hàn, MPa.

Một cách tổng quát, độ tin cậy R hay xác suất không hỏng của mối ghép hàn là xác suất $\tau_{\text{lim}} > \tau_{\text{td}}$:

$$R = P(g(X) > 0) = P((\tau_{\text{lim}} - \tau_{\text{td}}) > 0) \quad (6)$$

Với tải trọng tác dụng F , ứng suất cắt giới hạn τ_{lim} , các kích thước mối hàn... là các đại lượng ngẫu nhiên phân phối theo quy luật chuẩn.

2.3. Phương pháp xấp xỉ bậc nhất (FORM)

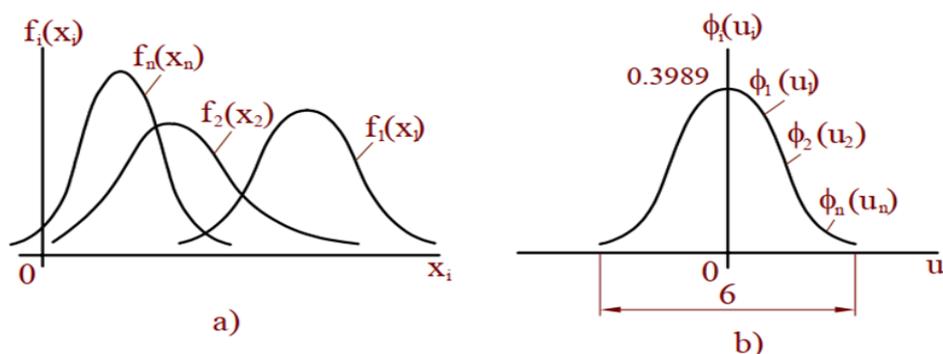
Phân tích độ tin cậy của mối ghép hàn là một bài toán phức tạp do chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiều yếu tố ngẫu nhiên, bao gồm tải trọng tác dụng, đặc tính vật liệu, sai số chế tạo và khuyết tật mối hàn. Trong khi các phương pháp mô phỏng trực tiếp như

Monte Carlo có thể cung cấp kết quả chính xác, chúng đòi hỏi số lượng mẫu rất lớn, dẫn đến chi phí tính toán cao, đặc biệt khi xác suất hỏng cần ước lượng ở mức rất nhỏ. Để khắc phục, phương pháp xấp xỉ bậc nhất (First Order Reliability Method – FORM) được sử dụng.

Phương pháp xấp xỉ bậc nhất gồm 2 bước: đầu tiên chuyển các biến ngẫu nhiên ban đầu sang không gian chuẩn, tiếp theo là xấp xỉ bậc nhất hàm trạng thái giới hạn.

Các biến ngẫu nhiên X_i được chuẩn hóa thành biến U_i có phân phối chuẩn chuẩn hóa. Nhờ vậy, miền hỏng $g(X) \leq 0$ trong không gian thực được ánh xạ thành miền hỏng tương ứng trong không gian chuẩn. Để chuyển các biến ngẫu nhiên từ không gian ngẫu nhiên ban đầu sang không gian chuẩn thì đầu tiên hàm dưới dấu tích phân $f_x(x)$ được đơn giản hoá bằng cách biến đổi các biến ngẫu nhiên. Không gian của các biến ngẫu nhiên ban đầu $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ được gọi là không gian X như Hình 2a. Chuyển tất cả các biến ngẫu nhiên thiết kế từ không gian X sang không gian chuẩn U theo công thức (7). Trong đó, giá trị trung bình của các biến này bằng 0 và sai lệch chuẩn bằng 1 như Hình 2b.

$$F_{x_i}(x_i) = \Phi(u_i) \text{ với } X_i = m_{x_i} + U_i S_{x_i} \quad (7)$$



Hình 2. Hàm mật độ phân bố trong không gian X và U .

Sau khi biến đổi hàm trạng thái giới hạn có dạng $Y = g(U)$.

Khi đó độ tin cậy được xác định theo công thức:

$$R = P\{g(U) > 0\} = \int_{g(U)>0} \phi_U(u) du \quad (8)$$

Để việc tính toán hàm tích phân ở công thức (8) được đơn giản hơn thì hàm trạng thái giới hạn $g(U) = 0$ được xấp xỉ thành hàm tuyến tính thông qua phép khai triển Taylor bậc 1:

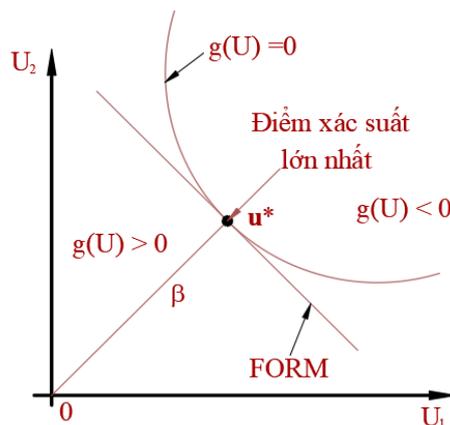
$$g(U) \approx g(u^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial U_i} \Big|_{u^*} (U_i - u_i^*) \quad (9)$$

Với $\mathbf{u}^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$ là điểm khai triển, T là ký hiệu ma trận chuyển vị và $\nabla g(\mathbf{u}^*)$ là gradien của hàm $g(\mathbf{U})$ tại \mathbf{u}^* .

Để giảm sai số, một phương pháp đơn giản thường được sử dụng là khai triển hàm $g(\mathbf{U})$ tại điểm có xác suất lớn nhất (MPP). Bài toán xác định điểm có xác suất lớn nhất chính là việc tìm điểm nằm trên mặt $g(\mathbf{U}) = 0$ đồng thời có mật độ phân phối theo \mathbf{U} đạt giá trị cực đại.

Khoảng cách $\beta = \|\mathbf{u}^*\|$ được gọi là chỉ số độ tin cậy, là khoảng cách ngắn nhất từ bề mặt $g(\mathbf{U}) = 0$ đến gốc độ tọa trong không gian \mathbf{U} như Hình 3. Điểm xác suất lớn nhất \mathbf{u}^* chính là tiếp điểm của hàm trạng thái giới hạn $g(\mathbf{U})$ và đường tròn có bán kính là β , do vậy vectơ đơn vị dọc theo vectơ \mathbf{u}^* có giá trị $\frac{\mathbf{u}^*}{\|\mathbf{u}^*\|} = \frac{\mathbf{u}^*}{\beta}$ bằng với giá trị của vectơ đơn vị \mathbf{a} :

$$\frac{\mathbf{u}^*}{\beta} = \mathbf{a} \text{ hoặc } \mathbf{u}^* = -\beta \mathbf{a} \quad (10)$$



Hình 3. Tích phân xác suất theo xấp xỉ bậc nhất

Khi đó hàm độ tin cậy sẽ được xác định qua công thức sau:

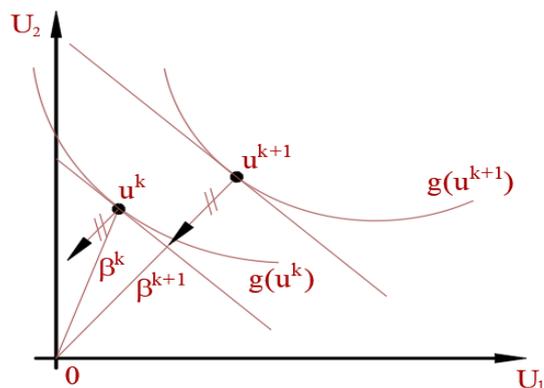
$$R \approx P\{L(\mathbf{U}) > 0\} = 1 - \Phi(\mathbf{a}\mathbf{u}^{*T}) = 1 - \Phi(-\beta \mathbf{a}\mathbf{a}^T) = 1 - \Phi(-\beta) \quad (11)$$

Có rất nhiều phương pháp số đã được phát triển để thực hiện công việc tìm điểm xác suất lớn nhất. Giải thuật tìm kiếm điểm xác suất lớn nhất này sử dụng công thức hồi quy và nó dựa vào tuyến tính hoá hàm trạng thái giới hạn. Giá trị điểm xác suất lớn nhất ở vòng lặp thứ k là \mathbf{u}^k được xác định theo công thức:

$$g(\mathbf{u}^{k+1}) = g(\mathbf{u}^k) + \nabla g(\mathbf{u}^k)(\mathbf{u}^{k+1} - \mathbf{u}^k)^T = 0 \quad (12)$$

Vì \mathbf{a} là vectơ đơn vị nên từ Hình 4 ta có:

$$\mathbf{u}^{k+1} = -\beta^{k+1} \mathbf{a}^k \quad (13)$$



Hình 4. Tìm điểm xác suất lớn nhất u^*

Thế u^k và u^{k+1} vào công thức (12) thu được:

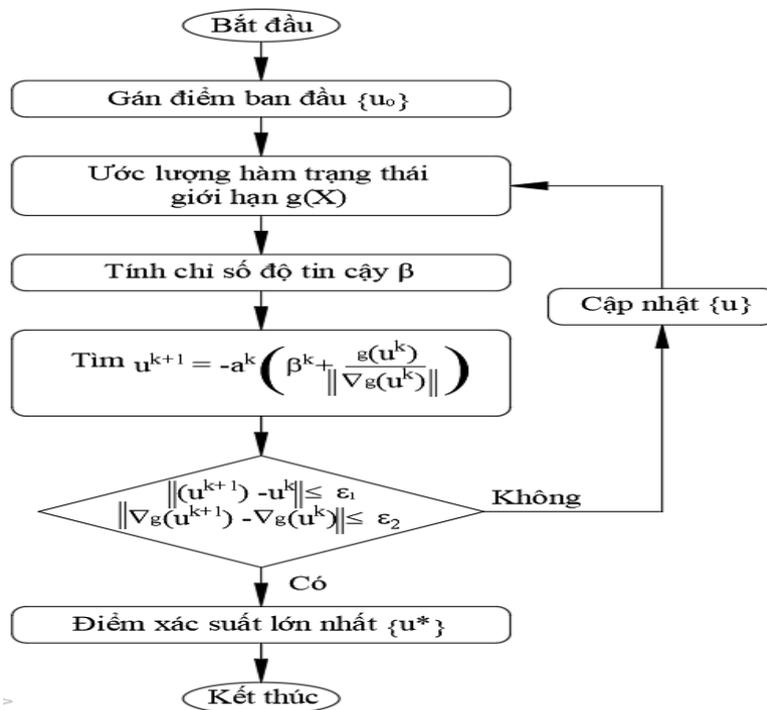
$$g(u^k) + \nabla g(u^k) (a^k)^T (\beta^k - \beta^{k+1}) = g(u^k) + \|\nabla g(u^k)\| (\beta^k - \beta^{k+1}) = 0 \quad (14)$$

Từ đây suy ra:

$$u^{k+1} = -\beta^{k+1} a^k = -a^k \left(\beta^k + \frac{g(u^k)}{\|\nabla g(u^k)\|} \right) \quad (15)$$

Để sử dụng công thức (15) ta cần phải có một điểm khởi đầu u^0 và thông thường $u^0 = 0$. Các điều kiện hội tụ được sử dụng để kết thúc vòng lặp:

$$\|u^{k+1} - u^k\| \leq \varepsilon_1; \quad \|\beta^{k+1} - \beta^k\| \leq \varepsilon_2; \quad \|\nabla g(u^{k+1}) - \nabla g(u^k)\| \leq \varepsilon_3$$



Hình 5. Giải thuật tìm điểm xác suất lớn nhất u^*

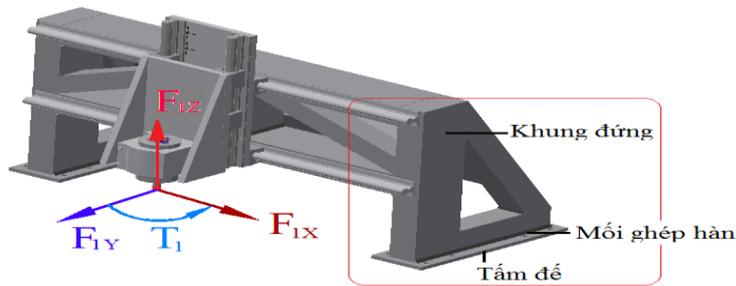
Thuật toán tìm kiếm MPP đã trình bày ở trên có ưu điểm đơn giản, tốc độ hội tụ cao trong nhiều trường hợp, vì vậy được ứng dụng rộng rãi trong phân tích độ tin cậy và thiết kế xác suất của các kết cấu. Tuy nhiên, trong một số tình huống, thuật toán có thể không hội tụ, chẳng hạn khi tồn tại dao động giữa hai hoặc nhiều điểm mà không đạt được hội tụ, hoặc khi xảy ra phân kỳ. Khi đó, một phương pháp thay thế hữu hiệu là sử dụng mô phỏng Monte Carlo (MCS) để ước lượng trực tiếp độ tin cậy.

Giải thuật tìm điểm xác suất lớn nhất được trình bày trên Hình 5.

3. Mô hình và phương pháp nghiên cứu

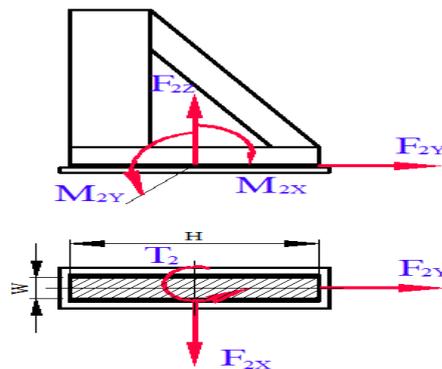
3.1. Mô hình kết cấu nghiên cứu

Thân máy CNC được thiết kế dưới dạng kết cấu hàn, bao gồm khung đứng, tấm đế và các mối ghép hàn liên kết. Tấm đế đóng vai trò làm nền, trực tiếp truyền tải trọng xuống bệ máy, đồng thời gia tăng độ ổn định và giảm rung động trong quá trình gia công. Khung đứng được gắn chặt với tấm đế thông qua mối ghép hàn, đảm bảo tạo thành một kết cấu liên khối có độ cứng vững cao. Trong kết cấu thân máy có nhiều mối ghép hàn, tuy nhiên chỉ thực hiện phân tích độ tin cậy cho mối ghép hàn như Hình 6.



Hình 6. Mối ghép hàn trên thân máy CNC

Trong quá trình làm việc, thân máy phải chịu đồng thời nhiều thành phần tải trọng phát sinh từ quá trình cắt gọt, bao gồm lực theo các phương X (F_{1X}), Y (F_{1Y}), Z (F_{1Z}) và momen xoắn T_1 . Các tải trọng này tác động lên kết cấu, gây ra biến dạng và ứng suất tập trung tại các vùng mối ghép hàn. Do đó, việc phân tích khả năng chịu tải của thân máy, đặc biệt là tại các vị trí liên kết hàn, có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá độ bền và độ tin cậy của kết cấu máy CNC.



Hình 7. Các thành phần lực trong mối ghép hàn

Mỗi ghép hàn chịu lực kéo F_{2Z} , Lực cắt F_{2X} , F_{2Y} , momen uốn M_{2X} , M_{2Y} và momen xoắn T_2 như Hình 7. Lực tác dụng F_{2X} , F_{2Y} , F_{2Z} ứng suất cho phép và chiều cao mỗi hàn là các đại lượng ngẫu nhiên có giá trị cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Các đại lượng ngẫu nhiên

Đại lượng	Giá trị trung bình	Độ lệch chuẩn
Lực tác dụng F_{2X} , N	100	10
Lực tác dụng F_{2Y} , N	170	17
Lực tác dụng F_{2Z} , N	24	2,4
Momen M_{2X} , Nmm	46333	4633.3
Momen M_{2Y} , Nmm	13851	1385.1
Momen T_2 , Nmm	5076	507.6
Giới hạn bền cắt τ_{lim} , MPa	150	15
Chiều cao mỗi hàn k , mm	5	0,5
Chiều dài đường hàn, H	400	40
Khoảng cách hai đường hàn, W	100	10

3.2. Hàm trạng thái giới hạn theo chỉ tiêu độ bền cắt

Ứng suất tương đương sinh ra trong mỗi ghép hàn [1]:

$$\tau_{td} = \sqrt{\left(\frac{F_{2Z}}{A} + \frac{M_{2x}}{I_x} \times y_{max} + \frac{M_{2y}}{I_y} \times x_{max}\right)^2 + 3\left[\left(\frac{F_{2x}}{A} + \frac{T_2}{J_p} \times y_{max}\right)^2 + \left(\frac{F_{2y}}{A} + \frac{T_2}{J_p} \times x_{max}\right)^2\right]}$$

Trong đó:

$$I_x = \frac{0.707 kH^3}{6}; I_y = \frac{(W + 2 \times 0.707k)^3 - W^3}{12} H; A = 2 \times 0.707 \times k \times H$$

Hàm trạng thái giới hạn theo ứng suất cắt giới hạn trong mặt cắt nguy hiểm của mỗi hàn như sau:

$$g(X) = \tau_{lim} - \tau_{td} \\ = \tau_{lim} - \sqrt{\left(\frac{F_{2Z}}{A} + \frac{M_{2x}}{I_x} \times y_{max} + \frac{M_{2y}}{I_y} \times x_{max}\right)^2 + 3\left[\left(\frac{F_{2x}}{A} + \frac{T_2}{J_p} \times y_{max}\right)^2 + \left(\frac{F_{2y}}{A} + \frac{T_2}{J_p} \times x_{max}\right)^2\right]}$$

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Kết quả phân tích FORM

Phương pháp xấp xỉ bậc nhất (FORM) được xem là công cụ hữu hiệu nhờ khả năng cân bằng giữa độ chính xác và chi phí tính toán. Giải thuật tính toán hội tụ sau 4 vòng lặp. Kết quả trình bày trong Bảng 2. Kết quả chỉ số độ tin cậy $\beta = 3.38$, tra bảng ta có được độ tin cậy tương ứng $R_{FORM} = 0.99963$.

Bảng 2. Kết quả hội tụ

Bước lặp	$\begin{Bmatrix} u_{\tau_{lim}} \\ u_{F_{2x}} \\ u_{F_{2y}} \\ u_{F_{2z}} \\ \dots \end{Bmatrix}$	$g(u)$	$\nabla g(u)$	$\ \nabla g(u)\ $	β
1	$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \end{Bmatrix}$	154.954	$\begin{Bmatrix} 15 \\ -30.8212 \\ -2.5562 \\ -7.6429 \\ \dots \end{Bmatrix}$	34.7826	0
2	$\begin{Bmatrix} -1.918 \\ 2.669 \\ 0.076 \\ 0.980 \\ \dots \end{Bmatrix}$	0.3712	$\begin{Bmatrix} 15 \\ -20.1979 \\ -0.5998 \\ -6.8595 \\ \dots \end{Bmatrix}$	30.2172	3.5038
3	$\begin{Bmatrix} -4.1314 \\ 2.3751 \\ 0.0319 \\ 0.3734 \\ \dots \end{Bmatrix}$	-0.029	$\begin{Bmatrix} 15 \\ -20.236 \\ -0.5999 \\ -6.8699 \\ \dots \end{Bmatrix}$	30.2345	3.4944
4	$\begin{Bmatrix} -4.1297 \\ 2.3770 \\ 0.0319 \\ 0.3756 \\ \dots \end{Bmatrix}$	$-2.5748 \cdot 10^{-5}$	$\begin{Bmatrix} 15 \\ -20.236 \\ -0.5999 \\ -6.8699 \\ \dots \end{Bmatrix}$	30.2349	3.38

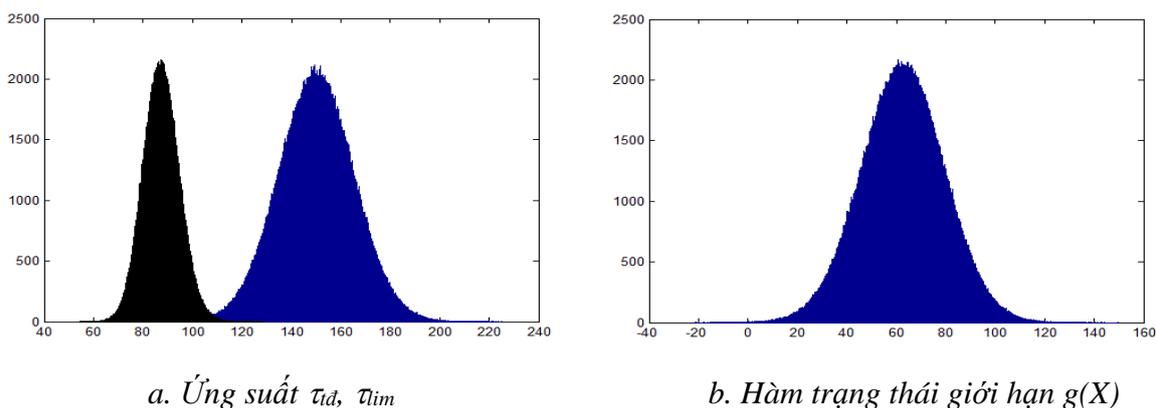
4.2. Mô phỏng Monte Carlo cho môi ghép hàn

Để kiểm chứng kết quả, mô phỏng Monte Carlo với số lượng mẫu lớn được thực hiện song song để phân tích độ tin cậy của môi ghép hàn. Bảng 3 trình bày các đặc trưng thống kê chính của hàm trạng thái giới hạn $g(X)$ với $N = 5 \times 10^6$ mẫu. Kết quả cho thấy Giá trị trung bình $m_{g(X)} = 62.638$ MPa và độ lệch chuẩn $S_{g(X)} = 16.629$ MPa, phản ánh biên an toàn dương và tương đối ổn định. Độ tin cậy ước lượng từ MCS đạt $R_{MCS} = 0.99960$.

Bảng 3. Kết quả phân tích độ tin cậy theo MCS

Số mẫu mô phỏng N	Giá trị trung bình $m_{g(X)}$	Độ lệch chuẩn $S_{g(X)}$	Độ tin cậy R_{MCS}
5.10^6	62,638	16,629	0.99960

Hình 8 minh họa trực quan phân bố ngẫu nhiên của giới hạn bền cắt τ_{lim} , ứng suất lớn nhất τ_{td} và hàm trạng thái giới hạn $g(X)$.



Hình 8. Đồ thị mật độ phân phối theo mô phỏng monte Carlo

Kết quả cho thấy, hầu hết các mẫu đều nằm trong miền an toàn ($g(X) > 0$). Biểu đồ tần suất của $g(X)$ có dạng gần phân bố Gauss, với độ lệch (skewness) xấp xỉ bằng không và độ nhọn (kurtosis) khoảng ba, cho thấy ảnh hưởng phần đuôi không đáng kể và rủi ro xuất hiện các kịch bản mất an toàn cực đoan là rất thấp. Kết quả phân tích độ tin cậy theo MCS và FORM trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả phân tích độ tin cậy theo MCS và FORM

Phương pháp	MCS	FORM
Độ tin cậy R	0.99960	0.99963

Nhận xét:

Sai số tương đối của phương pháp FORM so với MCS:

$$\varepsilon_{FORM} = \frac{P_{FORM} - P_{MCS}}{P_{MCS}} \times 100\% = \frac{3.7 \times 10^{-4} - 4.0 \times 10^{-4}}{4.0 \times 10^{-4}} \times 100\% = 7.5\%$$

Sai số tương đối của phương pháp FORM so với MCS là 7.5%, khẳng định rằng phương pháp FORM có thể thay thế đáng tin cậy cho MCS trong quá trình phân tích độ tin cậy. Trong khi MCS đòi hỏi số lượng mẫu lớn và chi phí tính toán cao, FORM cho phép ước lượng nhanh hơn với độ chính xác tương đương. Điều này đặc biệt có ý nghĩa trong nghiên cứu mối ghép hàn, nơi việc đánh giá nhiều kịch bản thiết kế và tải trọng là cần thiết để tối ưu hóa kết cấu trên cơ sở độ tin cậy.

4.3. Phân tích độ nhạy (Sensitivity Analysis)

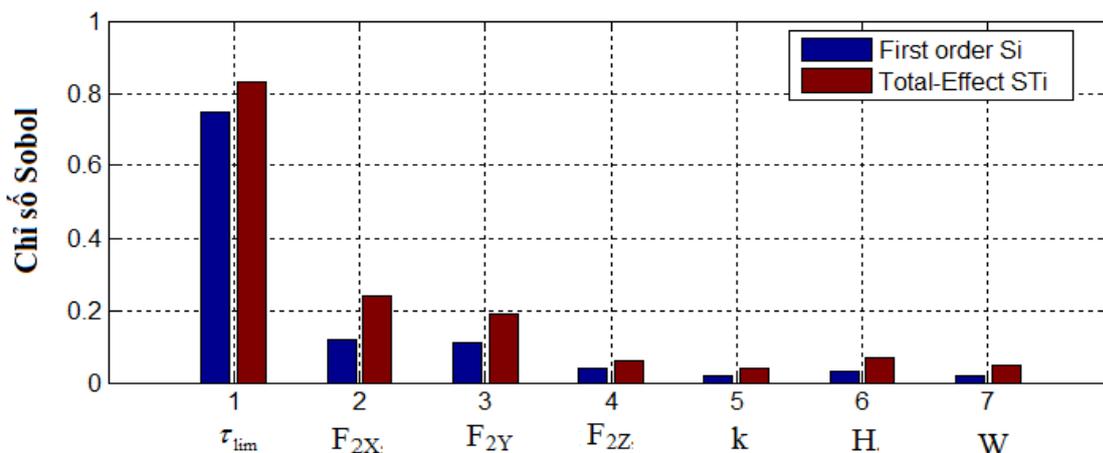
Để đánh giá thêm độ tin cậy của mỗi ghép hàn trong điều kiện bất định, phân tích độ nhạy toàn cục (GSA) đã được thực hiện bằng cách sử dụng các chỉ số Sobol. Phân tích này xem xét các biến thiết kế ngẫu nhiên chính bao gồm Giới hạn bền cắt (τ_{lim}), lực tác dụng (F_i), Kích thước (H) và (W), Chiều cao mỗi hàn (k) và mô đun đàn hồi (E). Kết quả được tóm tắt trong Bảng 5 và Hình 9.

Bảng 5. Phân tích độ nhạy toàn cục của các biến ngẫu nhiên bằng chỉ số Sobol

Biến ngẫu nhiên	S_i (First-order)	S_{Ti} (Total effect)	Nhận xét
Giới hạn bền cắt τ_{lim}	0.75	0.83	Yếu tố quan trọng nhất, chi phối độ tin cậy
Lực tác dụng F_{2x}, N	0.12	0.24	Ảnh hưởng trung bình
Lực tác dụng F_{2y}, N	0.11	0.19	Ảnh hưởng trung bình
Lực tác dụng F_{2z}, N	0.04	0.06	Ảnh hưởng trung bình
Chiều cao mỗi hàn k, mm	0.02	0.04	Ảnh hưởng rất nhỏ
Kích thước H, mm	0.03	0.07	Ảnh hưởng rất nhỏ
Kích thước W, mm	0.02	0.05	Ảnh hưởng rất nhỏ

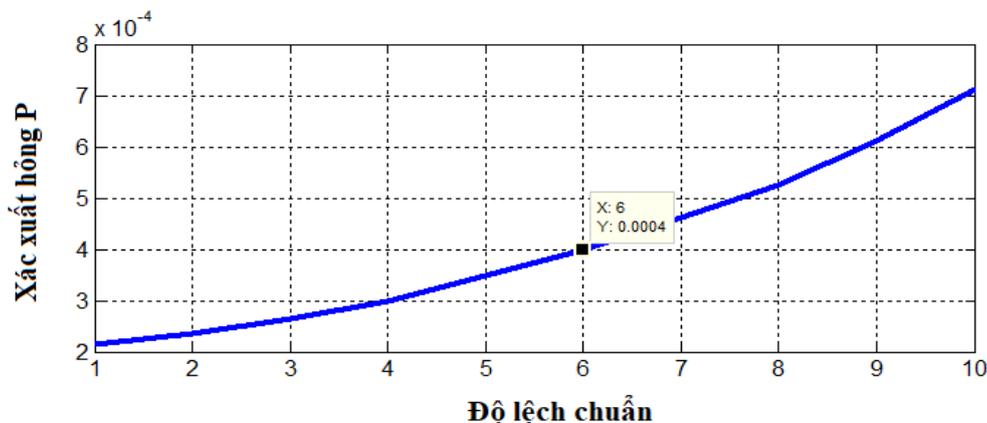
Kết quả GSA mang lại những hiểu biết sâu hơn về hành vi độ tin cậy của mỗi ghép hàn. Như thể hiện trong Bảng 5, Giới hạn bền cắt của vật liệu mỗi ghép (τ_{lim}) là thông số quan trọng nhất, chiếm khoảng 75% ảnh hưởng bậc một và 83% ảnh hưởng tổng. Điều này khẳng định rằng sự biến thiên trong đặc tính bền cắt quyết định tuổi thọ làm việc và độ tin cậy của mỗi ghép. Do đó, kiểm soát chất lượng vật liệu và nâng cao khả năng chịu bền cắt là những chiến lược chủ đạo để cải thiện độ tin cậy của hệ thống.

Các lực tác dụng F_{2x} , F_{2y} và F_{2z} thể hiện mức ảnh hưởng trung bình, trong đó F_{2x} nổi bật hơn do đặc trưng truyền tải trọng dọc theo phương chính. Ngược lại, các thông số hình học như chiều cao mỗi hàn (k), kích thước H và chiều rộng W chỉ có tác động rất nhỏ đến độ tin cậy, cho thấy biến thiên trong phạm vi thiết kế của chúng không làm thay đổi đáng kể trạng thái an toàn.



Hình 9. Kết quả phân tích độ nhạy toàn cục bằng chỉ số Sobol

Phân tích này cũng phản ánh sự phân tán vốn có trong các đặc tính cơ học của vật liệu mỗi ghép hàn, vốn là bộ phận chịu tải chính của hệ thống kết cấu. Để minh họa rõ hơn, ảnh hưởng của độ lệch chuẩn của giới hạn bền cắt đến xác suất hỏng đã được khảo sát và thể hiện trong Hình 10, khi độ lệch chuẩn của giới hạn bền cắt tăng lên, xác suất hỏng tăng đáng kể, ngay cả khi giá trị trung bình vẫn không đổi. Điều này nhấn mạnh vai trò chi phối của sự biến thiên vật liệu trong việc xác định độ tin cậy của hệ thống.



Hình 10. Ảnh hưởng độ lệch chuẩn $S_{\tau_{lim}}$ của giới hạn bền cắt đến xác suất hỏng P

Tóm lại, giới hạn bền cắt của vật liệu mỗi ghép hàn (τ_{lim}) thể hiện ảnh hưởng chi phối nhất đến xác suất hỏng, tiếp theo là lực tác dụng (F_i) và chiều cao mỗi hàn (k). Kết quả này hoàn toàn hợp lý về mặt cơ học, bởi mỗi ghép phải chịu bền cắt lặp lại, khiến đặc tính bền cắt trở thành yếu tố quyết định độ tin cậy tổng thể.

Do đó, phân tích độ nhạy không chỉ xác định các biến ngẫu nhiên quan trọng nhất mà về mặt thực tiễn, kết quả này nhấn mạnh vai trò then chốt của việc kiểm soát chất lượng và ổn định cơ tính vật liệu, đồng thời gợi ý rằng các chiến lược cải thiện độ tin cậy nên tập trung vào việc lựa chọn vật liệu phù hợp, tối ưu quy trình chế tạo và giảm thiểu sai lệch trong đặc tính mỗi.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình phân tích độ tin cậy cho mỗi ghép hàn chịu tải trọng phức tạp. Hàm trạng thái giới hạn được thiết lập dựa trên điều kiện bền cắt, có khả năng phản ánh chính xác cơ chế phá hỏng.

Kết quả phân tích bằng phương pháp FORM cho thấy chỉ số độ tin cậy $\beta=3,38$, tương ứng với độ tin cậy $R_{FORM} = 0,99963$. Sai số tương đối của phương pháp FORM so với MCS là 7.5%, khẳng định rằng phương pháp FORM có thể thay thế đáng tin cậy cho MCS trong quá trình phân tích độ tin cậy. Trong khi MCS đòi hỏi số lượng mẫu lớn và chi phí tính toán cao, FORM cho phép ước lượng nhanh hơn với độ chính xác tương đương. Điều này đặc biệt có ý nghĩa trong nghiên cứu mỗi ghép hàn, nơi việc đánh giá nhiều kịch bản thiết kế và tải trọng là cần thiết để tối ưu hóa kết cấu trên cơ sở độ tin cậy.

Kết quả phân tích Sobol khẳng định giới hạn bền cắt của mỗi hàn là tham số chi phối lớn nhất đến độ tin cậy, trong khi các yếu tố hình học (như chiều cao mỗi hàn) có ảnh hưởng thứ yếu. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kiểm soát chất lượng vật liệu và quy trình hàn trong thực tiễn chế tạo.

Hướng phát triển: Trong tương lai, nghiên cứu có thể mở rộng theo hướng xét đến ảnh hưởng của tải trọng môi, môi trường làm việc khắc nghiệt (nhiệt độ, ăn mòn) và các mô hình đa vật lý phức tạp hơn. Đồng thời, việc tích hợp FORM với các thuật toán tối ưu sẽ giúp xây dựng quy trình thiết kế RBDO toàn diện cho kết cấu hàn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Lộc, N. H – Cơ sở Thiết kế máy. ĐH Quốc gia TP. HCM, 2016.
- [2]. Kate, M. A. J., Jadhav, S. A Theoretical and Experimental Analysis of Fillet Weld.
- [3]. Murakami, T., Inoue, T., Shimura, H., Nakano, M., Sasaki, S.- Damping and tribological properties of Fe–Si–C cast iron prepared using various heat treatments. *Materials Science and Engineering: A*, 432(1), (2006), 113-119.
- [4]. Sarhan, A. A., Besharaty, S., Akbaria, J., Hamdi, M. (2015). Improvement on a CNC Gantry Machine Structure Design for Higher Machining Speed Capability. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9(4), 577-581.
- [5]. Bamberg, E.- Principles of rapid machine design. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [6]. Du X., Chen W. - Sequential optimization and reliability assessment method for efficient probabilistic design. *J Mech Des Trans ASME* 126 (2004) 225–233.
- [7]. Eggert R. J. - Quantifying design feasibility using probabilistic feasibility analysis, 17th Design automation conference presented at the 1991 ASME design technical

- conferences, Anonymous Publ by ASME, New York, NY, USA, Miami, FL, USA, **32** (1991) 235-240.
- [8]. Hu Y., Wang L., Liang J., Wang T. - Dynamic Analysis on and Optimized Design of the Bed Structure of CNC machine, Chinese Control and Decision Conference, (2011) 220-225.
- [9]. Rahman S, Xu H. - A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics. *Probab Eng Mech* **19** (2004).
- [10]. Xu H., Rahman S. - A generalized dimension-reduction method for multidimensional integration in stochastic mechanics, *Int J Numer Methods Eng* **61** (2004) 1992-2019.
- [11]. Broding W., Diederich F., Parker P. - Structural optimization and design based on a reliability design criterion, *J Spacecr Rockets* **1**(1964) 56-61.
- [12]. Padmanabhan D., Agarwal H., John E. - A study using Monte Carle Simulation for failure probability calculation in Reliability – Based Optimization, in *Optimization and Engineering* **7** (2006) 297-316.
- [13]. Kahn, H. - “Use of Different Monte Carlo Sampling Techniques,” *Proc. Symp. on Monte Carlo Methods*, Editor: Meyer, H. A., John Wiley & Sons, New York, (1956) 149-190.
- [14]. Rubinstein, R.Y. - *Simulation and Monte Carlo Method*, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [15]. Walker J. R. -*Practical Application Of Variance Reduction Techniques In Probabilistic Assessments-the Second International Conference on Radioactive Waste Management*, Winnipeg, Manit, Canada (1986) 517-521.
- [16]. Qu X. - Reliability-based structural optimization using response surface approximations and probabilistic sufficiency factor, *Doctoral Thesis*, University of Florida (2004).
- [17]. Rahman S., Xu H. - A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics. *Probab Eng Mech* **19** (2004) 393-408.
- [18]. Rajashekhar M., Ellingwood B. - A new look at the response surface approach for reliability analysis, *Struct Saf* **12** (1993) 205-220.
- [19]. Tu J., Choi K. K. - A new study on reliability-based design optimization, *Journal of Mechanical Design* **121** (1999) 557-564.
- [20]. Tu J., Choi K. K., Park Y. H.- Design potential method for reliability based system parameter design using adaptive probabilistic constraint evaluation, *AIAA Journal* **39** (2001) 667-677.

RELIABILITY-BASED ANALYSIS OF WELDED JOINTS USING THE FIRST-ORDER RELIABILITY METHOD

Tran Van Thuy¹

ABSTRACT

Welded joints are widely used in mechanical and structural engineering due to their simplicity and high strength. However, their performance is strongly affected by uncertainties in loads, material properties, and fabrication errors. Conventional deterministic design methods often neglect these variations, which may result in either overly conservative or unsafe designs. This study applies the First Order Reliability Method (FORM) to evaluate the reliability of welded joints, providing an efficient approach to quantify uncertainties and estimate failure probabilities. Based on the CNC machine frame model, the limit state function was formulated according to the equivalent shear stress criterion. Random variables include applied loads, bending and torsional moments, shear strength, and weld size. The FORM analysis yielded a reliability index $\beta = 3.38$, corresponding to a reliability level of $R_{FORM} = 0.99963$. Monte Carlo Simulation (MCS) with 5×10^6 samples provided nearly identical results ($R_{MCS} = 0.99960$). The relative error of FORM method compared to MCS is 7.5% confirming the accuracy and computational efficiency of FORM. Sensitivity analysis further indicated that weld shear strength is the most critical factor, while geometric variations have a relatively minor influence. The study demonstrates that FORM is a robust and efficient tool for reliability-based analysis and design of welded joints.

Keywords: Reliability; welded joint; FORM; Monte Carlo simulation; sensitivity analysis.



¹Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Phạm Văn Đồng;

Email: tvthuy@pdu.edu.vn.