

## NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ĐƯỜNG CONG ỨNG SUẤT-BIẾN DẠNG CỦA THÉP KHÔNG GỈ SUS304

Phan Nhất Tuấn<sup>1</sup>, Võ Tuyền<sup>2\*</sup>, Đặng Văn Hải<sup>2</sup>, Trịnh Tiên Thọ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trung tâm Giáo dục nghề nghiệp – Giáo dục thường xuyên Quận 10,  
Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>2</sup>Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

\*Email: [tuyenv@huit.edu.vn](mailto:tuyenv@huit.edu.vn)

Ngày nhận bài: 22/9/2025; Ngày nhận bài sửa: 03/11/2025; Ngày chấp nhận đăng: 05/12/2025

### TÓM TẮT

SUS304 là loại thép không gỉ (hay còn gọi là inox) là vật liệu rất phổ biến và được sử dụng rộng rãi nhất trên thế giới hiện nay. SUS304 có nhiều ưu điểm nổi bật như khả năng chống ăn mòn tốt, độ bền cao, dễ gia công, tính thẩm mỹ cao và an toàn cho sức khỏe. Vì vậy, vật liệu này được sử dụng trong hầu hết các ứng dụng ở mọi lĩnh vực như thực phẩm, y tế, các công trình kiến trúc, v.v. Trong nghiên cứu này, đường cong ứng suất-biến dạng của thép không gỉ SUS304 được mô phỏng. Từ đó cho thấy, cách thép không gỉ SUS304 phản ứng dưới tải trọng và cung cấp thông tin quan trọng về độ bền kéo, độ cứng, khả năng biến dạng dẻo và khả năng chống phá hủy của nó. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng (1) Độ dốc ban đầu của đường cong ứng suất-biến dạng cho thấy độ cứng của vật liệu, tức là khả năng chống biến dạng ban đầu khi chịu tải; (2) Điểm trên đường cong ứng suất-biến dạng mà vật liệu bắt đầu biến dạng vĩnh viễn là giới hạn chảy; (3) Điểm cao nhất trên đường cong ứng suất-biến dạng biểu thị độ bền kéo tối đa của vật liệu trước khi nó bắt đầu co thắt và cuối cùng là đứt gãy; (4) Khoảng cách từ điểm chảy đến điểm đứt gãy cho thấy, khả năng biến dạng dẻo của vật liệu SUS304 và (5) Đường cong ứng suất-biến dạng kết thúc ở điểm đứt gãy, biểu thị khả năng chịu tải cuối cùng của vật liệu.

*Từ khóa:* Mô phỏng, SUS304, đường cong ứng suất-biến dạng, phương trình Ramberg-Osgood.

### 1. GIỚI THIỆU

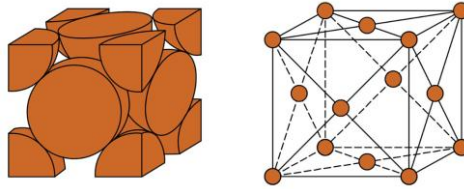
Thép không gỉ SUS304, còn gọi là inox 304 hoặc thép không gỉ 18/8 thuộc nhóm austenit, là loại thép austenit chứa khoảng 18% crom và 8% niken, mang lại khả năng chống ăn mòn, độ bền và độ dẻo dai cao. Ngoài khả năng chống ăn mòn tốt, thép không gỉ còn có khả năng chịu nhiệt cao [1]. Trong điều kiện bình thường, vật liệu SUS304 đặc biệt dễ gia công dát mỏng, có khả năng chịu ăn mòn hóa học tốt, dễ uốn hay hàn và có khả năng tạo hình tốt. Trong tự nhiên, vật liệu này được sử dụng trong hầu hết các ứng dụng ở mọi lĩnh vực, có thể thấy SUS304 ở mọi nơi xung quanh cuộc sống hàng ngày như bồn rửa, đồ gia dụng, đồ trang trí, sản xuất sản phẩm công nghiệp (ống công nghiệp, thùng chứa hóa chất, bulon, ốc vít, v.v.), các thiết bị trong nhà máy chế biến thực phẩm, nhà máy bia rượu, nhà máy sữa, kiến trúc, v.v. [2, 3].

Nói chung, thép không gỉ có các đặc điểm sau so với thép cacbon [4]:

- Độ bền cao hơn;
- Tính nhạy cảm cao hơn đối với biến cứng;
- Giới hạn chảy cao hơn và độ cứng gia công cao hơn, dẫn đến khả năng hồi phục lớn hơn so với thép cacbon;
- Xu hướng sử dụng dụng cụ cao hơn;
- Hệ số dẫn nhiệt thấp hơn, làm giảm sự tản nhiệt do biến dạng và ma sát.

Thép không gỉ austenit có cấu trúc tinh thể lập phương tâm mặt (Face-Centered Cubic – FCC) nên thép có tính dẻo cao, có khả năng hóa bền biến dạng mạnh (Hình 1). Tuy dẻo nhưng lại khó biến dạng

nguội (uốn, gò), do đó làm tăng độ bền, độ cứng của sản phẩm. Thép này có tổ chức một pha nên không thể hóa bền bằng nhiệt luyện. Để nâng cao tính chống mài mòn phải làm cho thép có một pha austenit đồng nhất. Khi nung lên đến một nhiệt độ nhất định, thép austenit có thể tiết cacbit crom ở biên giới hạt làm tăng nguy cơ ăn mòn biên giới hạt. Để khắc phục hiện tượng này có thể cho thêm một số nguyên tố tạo cacbit mạnh như titanium (Ti) hay niobi (Nb). Thép không gỉ austenit là hợp kim tương đối đắt nhất, vì cần tạo hợp kim với niken để ổn định pha FCC [5].



Hình 1. Ô cơ bản của thép không gỉ austenit FCC [6]

Khi nhiệt độ làm việc tăng lên, thép không gỉ SUS304 sẽ giảm độ bền kéo, có thể dẫn đến biến dạng. Cụ thể, độ bền của nó giảm đáng kể ở nhiệt độ cao, chẳng hạn ở 750 °C độ bền chỉ còn khoảng 1/3 so với nhiệt độ thường. Ở nhiệt độ trên 600-800 °C trong thời gian dài, SUS304 dễ bị giãn nở do nhiệt và nhạy cảm với sự ăn mòn liên kết hạt. Các vật liệu SUS304 đã qua xử lý dẻo (rèn, kéo, cán mỏng, v.v.) dễ bị biến dạng hơn khi nhiệt độ vượt quá 450 °C và chịu tác động trong khoảng 1 giờ [7].

Cơ tính và ứng suất của vật liệu thay đổi đáng kể theo nhiệt độ làm việc (Bảng 1). Nói chung, ở nhiệt độ cao, độ bền, độ cứng và mô đun đàn hồi của vật liệu giảm, trong khi độ dẻo tăng. Ngược lại, ở nhiệt độ thấp, độ bền, độ cứng và mô đun đàn hồi tăng, nhưng độ dẻo có thể giảm và vật liệu trở nên giòn hơn, đặc biệt là đối với kim loại. Ứng suất mà vật liệu có thể chịu đựng cũng giảm khi nhiệt độ tăng do sự suy giảm cơ tính.

Bảng 1. Thay đổi cơ tính và ứng suất theo nhiệt độ [6]

Yếu tố	Thay đổi khi tăng nhiệt độ	Thay đổi khi giảm nhiệt độ
Độ bền	Giảm, do liên kết nguyên tử yếu đi và sự trượt của các lớp vật liệu dễ dàng hơn	Tăng, liên kết nguyên tử mạnh hơn
Độ cứng	Giảm	Tăng
Độ dẻo (khả năng biến dạng dẻo)	Tăng, vật liệu dễ uốn nắn hơn	Giảm, vật liệu có nguy cơ bị gãy giòn cao hơn
Mô đun đàn hồi	Giảm	Tăng
Ứng suất chịu tải tối đa	Giảm do độ bền tổng thể giảm	Có thể tăng, nhưng nguy cơ gãy giòn tăng lên

Nghiên cứu này giới thiệu kết quả mô phỏng đường cong ứng suất-biến dạng kỹ thuật và đường cong ứng suất-biến dạng thực của thép không gỉ SUS304 theo Phương trình Ramberg-Osgood. Đồng thời, trình bày kết quả mô phỏng cơ sở dữ liệu ứng suất-biến dạng dẻo của vật liệu SUS304. Đóng góp chính của nghiên cứu là việc giới thiệu và mô phỏng thành công hành vi cơ học của thép không gỉ SUS304 dưới tải trọng dựa trên Phương trình Ramberg-Osgood. Nghiên cứu đã tính toán và xác định được hệ số Ramberg-Osgood  $n$  là 5,734, một tham số quan trọng mô tả hành vi biến dạng phi tuyến của vật liệu sau khi vượt qua giới hạn đàn hồi; hệ số  $n$  giúp hiểu rõ hơn về hành vi biến dạng dẻo của vật liệu dưới tải trọng. Kết quả mô phỏng cơ sở dữ liệu ứng suất-biến dạng vùng dẻo của vật liệu SUS304 cho thấy khả năng biến dạng vĩnh viễn của vật liệu này dưới tác dụng của lực bên ngoài. Ngoài ra, nghiên cứu rút ra được những thông tin cốt lõi về cơ tính của SUS304, bao gồm: độ cứng, giới hạn chảy, độ bền kéo tối đa, khả năng biến dạng dẻo và khả năng chịu tải cuối cùng thể hiện qua các đường cong mô phỏng.

## 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

### 2.1. Vật liệu

Trong mô phỏng, vật liệu tấm được chọn là thép không gỉ SUS304, vật liệu được ký hiệu theo tiêu chuẩn Nhật Bản (Japanese Industry Standard – JIS) [7]. Các sản phẩm dạng tấm thép không gỉ SUS304 hiện đang được dùng rất thông dụng trong nước để chế tạo các sản phẩm trong ngành các công nghiệp thực phẩm và đồ uống, vệ sinh, đông lạnh và bình chứa áp suất, v.v.

Tính chất cơ học và tính chất vật lý của thép không gỉ SUS304 được giới thiệu trong Bảng 2 và Bảng 3.

Bảng 2. Tính chất cơ học của SUS304 [8]

Cơ tính của SUS304 theo Atlas thép Úc					
Ứng suất bền min (MPa)	Giới hạn chảy min (MPa)	Độ giãn dài (%)	Độ cứng Brinell max	Độ cứng Rockwell max	Độ cứng Vickers max
515	205	40	201 HB	92 HRB	210 HV

Bảng 3. Tính chất vật lý của SUS304 [8]

Tính chất vật lý của SUS304 theo Atlas thép Úc					
Mật độ (kg/m <sup>3</sup> )	Điểm nóng chảy (°C)	Độ giãn nở nhiệt (/K)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Độ dẫn nhiệt (W/m.K)	Điện trở suất (Ω.m)
8000	1450	$17.2 \times 10^{-6}$	193	16.2	$0.072 \times 10^{-6}$

Theo dữ liệu từ Bảng 2 và 3 của vật liệu SUS304 ta có:

- Mô đun đàn hồi:  $E = 193 \text{ GPa} = 193.000 \text{ N/mm}^2$
- Độ bền kéo:  $\sigma = 515 \text{ MPa} = 515 \text{ N/mm}^2$
- Giới hạn chảy:  $\sigma_Y = 205 \text{ MPa} = 205 \text{ N/mm}^2$
- Độ giãn dài:  $\delta = 40\%$

Những giá trị này sẽ được dùng để tính toán, mô phỏng các đường cong ứng suất-biến dạng của thép không gỉ SUS304.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với số liệu được tính toán từ Phương trình Ramberg-Osgood và các phương trình được trình bày, sau đó tiến hành mô phỏng bằng phần mềm Matlab.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Đường cong ứng suất-biến dạng Ramberg-Osgood

Phương trình Ramberg-Osgood được xây dựng để mô tả mối quan hệ phi tuyến giữa ứng suất và biến dạng, tức là đường cong ứng suất-biến dạng đối với các vật liệu gần điểm chảy của chúng. Phương trình này đặc biệt áp dụng cho các kim loại hóa cứng do biến dạng dẻo, thể hiện sự chuyển tiếp đàn hồi-dẻo một cách trơn tru. Vì đây là một mô hình hiện tượng học, việc kiểm tra sự phù hợp của mô hình với dữ liệu thực nghiệm thực tế cho vật liệu cụ thể đang quan tâm là rất cần thiết.

Mối quan hệ hàm số

Ở dạng ban đầu, phương trình biến dạng Ramberg-Osgood như sau [9]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (1)$$

trong đó:  $\varepsilon$  – biến dạng;

$\sigma$  – ứng suất;

$E$  – mô đun đàn hồi;

$K$  và  $n$  – các hằng số phụ thuộc vào vật liệu đang xét. Ở dạng này,  $K$  và  $n$  không giống với các hằng số thường thấy trong phương trình Hollomon [10]

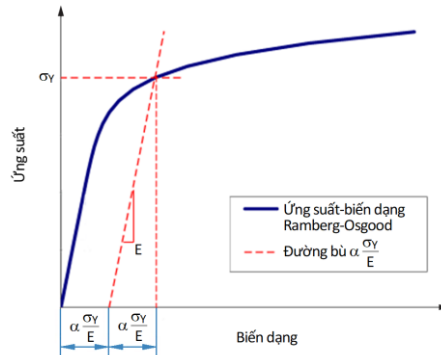
Số hạng đầu tiên ở vế phải của Phương trình (1),  $\sigma/E$ , bằng với phần đàn hồi của biến dạng, trong khi số hạng thứ hai,  $K(\sigma/E)^n$ , tính đến phần dẻo, các tham số  $K$  và  $n$  mô tả hành vi biến cứng của vật liệu. Cùng với giới hạn chảy của vật liệu,  $\sigma_Y$ , và định nghĩa một tham số mới,  $\alpha$ , liên hệ với  $K$  là  $\alpha = K(\sigma_0/E)^{n-1}$ , ta có thể viết lại số hạng ở vế phải ngoài cùng như sau:

$$K \left( \frac{\sigma}{E} \right)^n = \alpha \frac{\sigma}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^{n-1} \quad (2)$$

Thay vào Phương trình (1), phương trình Ramberg–Osgood có thể được viết như sau:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^{n-1} \quad (3)$$

Giá trị  $\alpha(\sigma_0/E)$  được coi là độ lệch giới hạn chảy, như thể hiện trong Hình 2. Điều này xuất phát từ thực tế là  $\varepsilon = (1 + \alpha)\sigma_0/E$ , khi  $\sigma = \sigma_Y$ .



Hình 2. Biểu diễn tổng quát đường cong ứng suất-biến dạng bằng phương trình Ramberg-Osgood. Biến dạng tương ứng với điểm chảy dẻo là tổng của các thành phần đàn hồi và dẻo [11].

### Hệ số Ramberg-Osgood

Hệ số Ramberg-Osgood là một tham số trong mô hình Ramberg-Osgood, mô tả hành vi biến dạng phi tuyến của vật liệu kim loại sau khi vượt qua giới hạn đàn hồi. Nó cho phép dự đoán cách vật liệu biến dạng dẻo khi chịu tải, kết hợp cả hai phần đàn hồi và dẻo của đường cong ứng suất-biến dạng, và được biểu thị bằng hệ số  $n$  (thường được gọi là hệ số  $n$  Ramberg-Osgood). Hệ số này, cùng với mô đun đàn hồi ban đầu ( $E$ ) và hệ số hiệu chỉnh biến dạng dẻo ( $K$ ), được sử dụng trong mô hình Ramberg-Osgood, một mô hình toán học mô tả quan hệ ứng suất-biến dạng phi tuyến của vật liệu.

Việc xác định hệ số  $n$  rất quan trọng đối với độ chính xác của đường cong. Sử dụng các tính chất cơ học đã biết như độ bền kéo cực đại ( $\sigma_{max}$ ) và độ giãn dài cực đại ( $\delta_{max}$ ),  $n$  có thể được xác định bằng phương trình sau [12]:

$$n = \frac{\ln \left( \frac{\delta_{max} - \frac{\sigma_{max}}{E}}{0.002} \right)}{\ln \left( \frac{\sigma_{max}}{\sigma_Y} \right)} \quad (4)$$

trong đó,  $\delta_{max}$  được xác định như sau [12]:

$$\begin{aligned} \delta &= 100 \left( \delta - \frac{\sigma_{max}}{E} \right) \\ &= 100 \left( \frac{40}{100} - \frac{515}{193000} \right) = 39,733 \end{aligned}$$

Thay giá trị trên vào Phương trình (4) ta có:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{39,733 - \frac{515}{193000}}{0,002}\right)}{\ln\left(\frac{515}{205}\right)} = 5,734$$

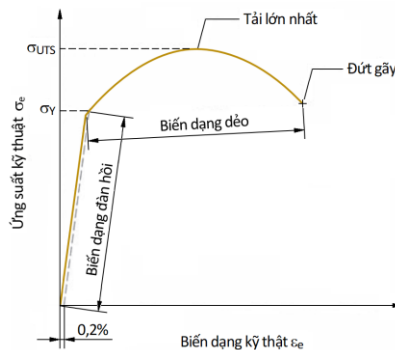
Trong kỹ thuật, hệ số Ramberg-Osgood giúp hiểu rõ hơn về hành vi biến dạng dẻo của vật liệu dưới tải trọng, giúp thiết kế các kết cấu và bộ phận chính xác và an toàn hơn. Hệ số  $n$  càng cao, vật liệu càng có xu hướng biến dạng dẻo. Hệ số  $n$  càng thấp, vật liệu càng có tính đàn hồi hơn và ít biến dạng dẻo hơn.

### 3.2. Mô phỏng đường cong ứng suất-biến dạng kỹ thuật của thép không gỉ SUS304

Đường cong ứng suất-biến dạng kỹ thuật điển hình từ thử nghiệm kéo mẫu kim loại được minh họa trong Hình 3. Ứng suất kỹ thuật  $\sigma_e$  tại bất kỳ điểm nào trên đường cong được xác định là lực chia cho diện tích ban đầu [13-16]:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

trong đó:  $\sigma_e$  – ứng suất kỹ thuật (MPa);  
 $F$  – lực tác dụng trong thử nghiệm (N);  
 $A_0$  – diện tích ban đầu của mẫu thử (mm<sup>2</sup>).



Hình 3. Đồ thị ứng suất-biến dạng kỹ thuật điển hình trong thử nghiệm kéo [15]

Tương tự, biến dạng kỹ thuật  $\epsilon_e$  được cho bởi [13-16]:

$$\epsilon_e = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$

trong đó:  $\epsilon_e$  – biến dạng kỹ thuật (mm/mm);  
 $l$  – chiều dài tại bất kỳ điểm nào trong quá trình kéo (mm);  
 $l_0$  – chiều dài đo ban đầu (mm).

Mối quan hệ ứng suất-biến dạng trong Hình 3 có hai vùng, cho thấy hai dạng ứng xử riêng biệt: (1) đàn hồi và (2) dẻo. Trong vùng đàn hồi, mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng là tuyến tính, và vật liệu thể hiện trạng thái đàn hồi bằng cách trở lại chiều dài ban đầu của nó khi tải trọng (ứng suất) được giải phóng. Mối quan hệ được xác định bởi định luật Hooke [13-16]:

$$\sigma_e = E \epsilon_e \quad (7)$$

trong đó  $E$  là mô đun đàn hồi của vật liệu.

Đối với vật liệu SUS304, biến dạng kỹ thuật được xác định qua Phương trình Ramberg-Osgood như sau [9]:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{1/n} \quad (8)$$

Trong nghiên cứu này, ứng suất chảy  $\sigma_Y$  được giả định ở biến dạng dư 0,2%, do đó có thể suy ra mối quan hệ sau [9]:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y}\right)^n \quad (9)$$

trong đó:  $\varepsilon_e$  – biến dạng kỹ thuật;

$E$  – mô đun đàn hồi (GPa);

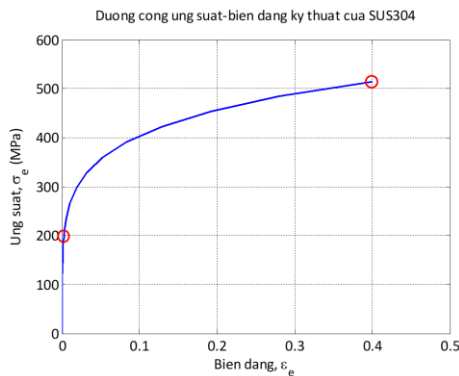
$\sigma$  – ứng suất thực (MPa);

$\sigma_Y$  – ứng suất chảy (MPa).

Từ Phương trình (6) kết hợp với các dữ liệu từ Bảng 2 và Bảng 3 và giá trị của hệ số Ramberg-Osgood được xác định từ Phương trình (4), sau khi tính toán có được bảng số liệu ứng suất-biến dạng kỹ thuật của thép không gỉ SUS304 (Bảng 4).

Bảng 4. Bảng số liệu ứng suất-biến dạng kỹ thuật của SUS304

$\sigma_e$ (MPa)	$\varepsilon_e$	$\sigma_e$ (MPa)	$\varepsilon_e$	$\sigma_e$ (MPa)	$\varepsilon_e$	$\sigma_e$ (MPa)	$\varepsilon_e$
0.0	0.00000	174.3	0.00169	267.0	0.01051	422.0	0.12874
41.0	0.00021	184.5	0.00205	298.0	0.01870	453.0	0.19251
82.0	0.00044	194.8	0.00250	329.0	0.03199	484.0	0.28065
123.0	0.00074	205.0	0.00306	360.0	0.05266	515.0	0.40000
164.0	0.00140	236.0	0.00571	391.0	0.08367		



Hình 4. Đường cong ứng suất-biến dạng kỹ thuật của SUS304

Xuất phát từ bảng số liệu ứng suất-biến dạng kỹ thuật của thép không gỉ SUS304 (Bảng 4), đường cong ứng suất-biến dạng kỹ thuật theo Phương trình Ramberg-Osgood được mô phỏng như thể hiện trong Hình 4.

Mô hình Ramberg-Osgood có độ chính xác tương đối tốt trong việc mô tả sự biến dạng phi tuyến của các vật liệu dẻo trong điều kiện kéo đơn, đặc biệt là đối với vật liệu có tính chất đàn hồi-dẻo, nhưng độ chính xác có thể thay đổi tùy thuộc vào các yếu tố như loại vật liệu, dải ứng suất và phương pháp thử nghiệm. Để có kết quả chính xác, cần có dữ liệu thử nghiệm thực tế để hiệu chỉnh các tham số của mô hình.

### 3.3. Mô phỏng đường cong ứng suất-biến dạng thực của thép không gỉ SUS304

Khi ứng suất tăng lên, một số điểm trong mối quan hệ tuyến tính cuối cùng đã đạt đến tại đó vật liệu bắt đầu chảy. Điểm chảy của vật liệu có thể được xác định trong Hình 4 bằng sự thay đổi độ dốc ở cuối vùng tuyến tính. Bởi vì điểm bắt đầu chảy thường khó quan sát thấy trong biểu đồ dữ liệu

thử nghiệm (nó thường không xảy ra khi độ dốc thay đổi đột ngột), điểm chảy thường được định nghĩa là ứng suất tại đó lượng dư biến dạng là 0,2% so với đường thẳng đã xảy ra. Cụ thể hơn, đó là điểm mà đường cong ứng suất-biến dạng của vật liệu giao với đường song song với phần thẳng của đường cong nhưng lệch với nó lượng biến dạng 0,2%. Điểm chảy là tính chất độ bền của vật liệu, do đó thường được gọi là giới hạn chảy (hay ứng suất chảy) [15].

Điểm chảy đánh dấu sự chuyển sang vùng dẻo và bắt đầu biến dạng dẻo của vật liệu. Mọi quan hệ giữa ứng suất và biến dạng không còn đúng với định luật Hooke nữa. Khi tải trọng tăng lên vượt quá điểm chảy, quá trình kéo dài của mẫu tiếp tục diễn ra, nhưng với tốc độ nhanh hơn nhiều so với trước, khiến độ dốc của đường cong thay đổi đáng kể. Giãn dài đi kèm với sự giảm đồng đều diện tích mặt cắt ngang, phù hợp với việc duy trì thể tích không đổi.

Sẽ có thể gặp khó khăn khi sử dụng diện tích ban đầu của mẫu thử để tính toán ứng suất kỹ thuật, thay vì diện tích thực tế (tức thời) ngày càng nhỏ hơn khi quá trình thử nghiệm diễn ra. Nếu diện tích thực được sử dụng, giá trị ứng suất tính toán sẽ cao hơn. Giá trị ứng suất nhận được bằng cách chia giá trị tức thời của tải trọng tác dụng cho diện tích được gọi là ứng suất thực [13-16]:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

trong đó:  $\sigma$  – ứng suất thực (MPa);

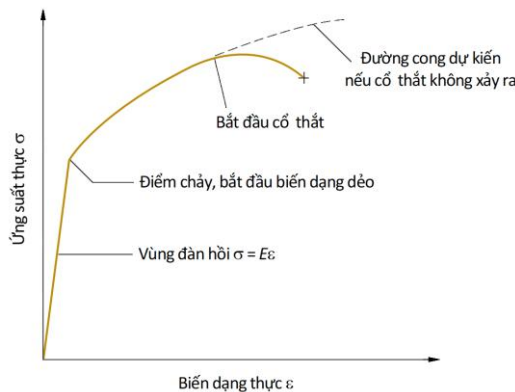
$F$  – lực (N);

$A$  – diện tích thực tế (tức thời) chịu tải ( $\text{mm}^2$ ).

Tương tự, biến dạng thực thể hiện đánh giá thực tế hơn về độ giãn dài “tức thời” trên một đơn vị chiều dài của vật liệu. Giá trị của biến dạng thực trong thử nghiệm kéo có thể được ước tính bằng cách chia tổng độ giãn dài thành các gia số nhỏ, tính toán biến dạng kỹ thuật cho từng gia số trên cơ sở chiều dài ban đầu của nó, và sau đó cộng các giá trị biến dạng. Trong giới hạn, biến dạng thực được xác định qua [15]:

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (11)$$

trong đó  $l$  là chiều dài tức thời tại bất kỳ thời điểm nào trong quá trình giãn dài.



Hình 5. Đường cong ứng suất-biến dạng thực cho đồ thị ứng suất-biến dạng kỹ thuật [15]

Khi dữ liệu ứng suất-biến dạng kỹ thuật trong Hình 3 được vẽ bằng giá trị ứng suất và biến dạng thực, đường cong kết quả sẽ có dạng như trong Hình 5. Trong vùng đàn hồi, đồ thị hầu như giống như ở trên. Giá trị biến dạng là nhỏ và biến dạng thực gần bằng với biến dạng kỹ thuật đối với hầu hết các kim loại quan trọng. Các giá trị ứng suất tương ứng cũng rất gần nhau. Lý do các giá trị gần bằng nhau là do diện tích mặt cắt ngang của mẫu thử không bị giảm đáng kể trong vùng đàn hồi. Do đó, định luật Hooke có thể được sử dụng để liên hệ ứng suất thực với biến dạng thực:  $\sigma = E\varepsilon$ .

Khi biến dạng trở nên đáng kể trong vùng dẻo, các giá trị của biến dạng thực và biến dạng kỹ thuật sẽ khác nhau. Biến dạng thực liên quan đến biến dạng kỹ thuật tương ứng qua biểu thức [15]:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (12)$$

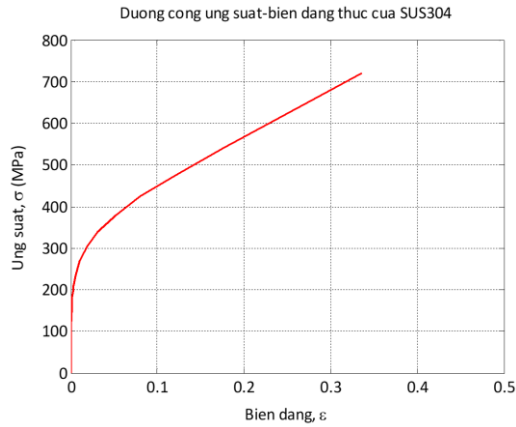
Tương tự, ứng suất thực và ứng suất kỹ thuật được liên hệ với nhau qua biểu thức [15]:

$$\sigma = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (13)$$

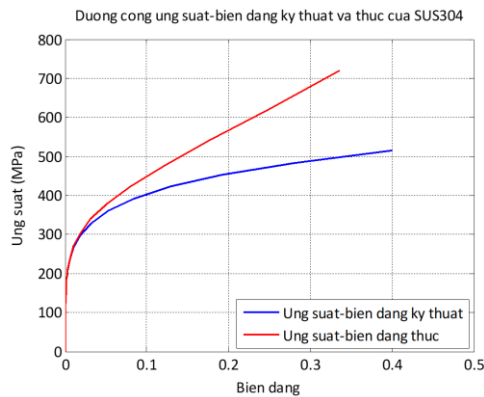
Từ Phương trình (12) và (13) tính toán được giá trị của ứng suất thực và biến dạng thực của thép không gỉ SUS304 và được trình bày trong Bảng 5. Qua đó mô phỏng được đường cong ứng suất–biến dạng thực theo Phương trình Ramberg-Osgood như thể hiện trong Hình 6. Hình 7 biểu diễn đường cong ứng suất–biến dạng kỹ thuật và đường cong ứng suất–biến dạng thực theo Phương trình Ramberg-Osgood của thép không gỉ SUS304.

Bảng 5. Bảng số liệu ứng suất–biến dạng thực của SUS304

$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon$	$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon$	$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon$	$\sigma$ (MPa)	$\varepsilon$
0.0	0.00000	174.5	0.00169	269.8	0.01045	476.3	0.12110
41.0	0.00021	184.9	0.00205	303.6	0.01852	540.2	0.17606
82.0	0.00044	195.2	0.00250	339.5	0.03149	619.8	0.24737
123.1	0.00074	205.6	0.00306	379.0	0.05132	721.0	0.33647
164.2	0.00140	237.3	0.00570	423.7	0.08035		



Hình 6. Đường cong ứng suất–biến dạng thực của SUS304



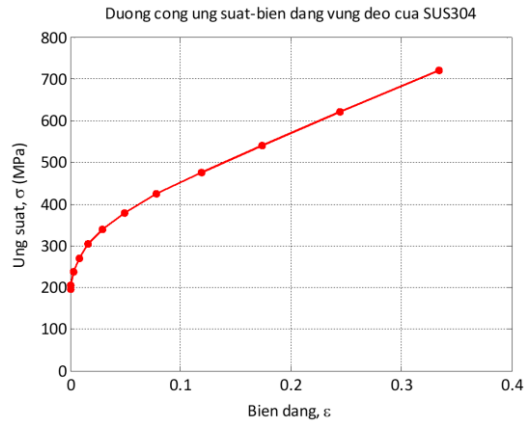
Hình 7. Đường cong ứng suất–biến dạng kỹ thuật và thực của SUS304

### 3.4. Mô phỏng cơ sở dữ liệu ứng suất–biến dạng dẻo của vật liệu SUS304

Các số liệu về ứng suất–biến dạng vùng dẻo của SUS304 được thể hiện trong Bảng 6. Từ đó, mô phỏng được đường cong ứng suất–biến dạng vùng dẻo của SUS304 như thể hiện trong Hình 8.

Bảng 6. Bảng số liệu ứng suất-biến dạng vùng dẻo của SUS304

$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$
0.00000	195.3	0.01603	303.6	0.11861	476.3
0.00056	205.6	0.02899	339.5	0.17356	540.2
0.00320	237.3	0.04882	379.0	0.24487	619.8
0.00796	269.8	0.07786	423.7	0.33398	721.0



Hình 8. Đường cong ứng suất-biến dạng vùng dẻo của SUS304

Đồ thị ứng suất-biến dạng của thép không gỉ SUS304 thể hiện trên các Hình 4 và Hình 6 đến Hình 8 cho thấy mối quan hệ tuyến tính ở giai đoạn đầu (biến dạng đàn hồi) và sau đó chuyển sang giai đoạn biến dạng dẻo khi tải trọng tăng. Khi tải trọng vượt quá giới hạn đàn hồi, vật liệu bắt đầu biến dạng vĩnh viễn, thể hiện trên đồ thị bằng sự thay đổi độ dốc từ tuyến tính sang đường cong phi tuyến. Qua các đường cong ứng suất-biến dạng có thể rút ra nhận xét:

- Độ dốc ban đầu của đường cong ứng suất-biến dạng cho thấy độ cứng của vật liệu, tức là khả năng chống biến dạng ban đầu khi chịu tải.
- Điểm trên đường cong ứng suất-biến dạng mà vật liệu bắt đầu biến dạng vĩnh viễn là giới hạn chảy. Đối với SUS304, điều này cho biết mức độ ứng suất tối đa mà nó có thể chịu trước khi biến dạng dẻo.
- Điểm cao nhất trên đường cong ứng suất-biến dạng biểu thị cường độ bền kéo tối đa của vật liệu trước khi nó bắt đầu bị co thắt và cuối cùng là đứt gãy.
- Khoảng cách từ điểm giới hạn chảy đến điểm đứt gãy cho thấy, khả năng biến dạng dẻo của vật liệu SUS304 có độ dẻo cao, cho phép nó biến dạng đáng kể trước khi bị phá hủy.
- Đường cong ứng suất-biến dạng kết thúc ở điểm đứt gãy, biểu thị khả năng chịu lực cuối cùng của vật liệu.

Mô hình Ramberg-Osgood có sai số khi sử dụng ở các điều kiện ngoài phạm vi được định nghĩa, đặc biệt là trong vùng biến dạng đàn hồi hoặc khi vật liệu có các đặc tính đặc biệt không được mô hình hóa. Ngoài ra, mô hình này giả định một phương trình đơn giản cho đường cong ứng suất-biến dạng, nên có thể không chính xác trong trường hợp các đường cong thực tế phức tạp hoặc khi có hiệu ứng nhiệt.

#### 4. KẾT LUẬN

Thép không gỉ SUS304 thuộc nhóm austenit có cấu trúc tinh thể lập phương tâm mặt (FCC) nên thép có tính dẻo cao, có khả năng hóa bền biến dạng mạnh. Tuy dẻo nhưng SUS304 lại khó biến dạng nguội (uốn, gò), do đó làm tăng mạnh độ bền, độ cứng của sản phẩm.

Đường cong chảy dẻo, còn gọi là đường cong ứng suất-biến dạng, cho thấy khả năng biến dạng vĩnh viễn của vật liệu dưới tác dụng của lực bên ngoài. Ý nghĩa của nó là mô tả hành vi vật liệu, cung cấp thông tin về độ bền, độ cứng và khả năng chống phá hủy, giúp dự đoán độ dẻo và giới hạn phá hủy của

vật liệu trong các ứng dụng kỹ thuật.

Trong nghiên cứu này, đường cong ứng suất-biến dạng kỹ thuật và đường cong ứng suất-biến dạng thực của vật liệu kim loại nói chung và của SUS304 nói riêng đã được trình bày. Đường cong ứng suất-biến dạng của SUS304 mô tả cách thép không gỉ nhóm austenit phản ứng dưới tải trọng, cung cấp thông tin quan trọng về độ bền kéo, độ cứng, khả năng biến dạng dẻo, và khả năng chống phá hủy của nó. Nó hoạt động như một “hồ sơ” vật liệu, giúp xác định các giới hạn vật lý và dự đoán ứng xử của thép khi chịu tác động lực trong các ứng dụng thực tế.

Mô hình ứng suất-biến dạng Ramberg-Osgood chủ yếu được sử dụng cho các vật liệu kim loại có tính chất biến dạng dẻo. Nó mô tả hành vi ứng suất-biến dạng của các kim loại khác nhau trong giai đoạn từ đàn hồi đến biến dạng dẻo. Mô hình này thích hợp với các kim loại có hành vi biến dạng dẻo có thể dự đoán được, chẳng hạn như thép, nhôm, titan và các hợp kim khác có tính chất tương tự. Các tham số của mô hình Ramberg-Osgood có thể được hiệu chỉnh bằng cách so sánh kết quả của mô hình với dữ liệu thực nghiệm. Đó là nội dung sẽ được nghiên cứu tiếp theo để có được các dữ liệu thực nghiệm.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Elga, *Stainless Steel Technical Handbook*. Gothenburg, Sweden: Elga, 2016.
- [2] <chrome-extension://efaidnbmninnbpcajpcgclefindmkaj/https://ucpcdn.thyssenkrupp.com>
- [3] <legacy/UCPthyssenkruppBAMXUK/assets.files/material-data-sheets/stainless-steel/stainless-steel-1.4301-304>
- [4] <https://www.metalshims.com/t-304-Stainless-Steel-technical-data-sheet.aspx>
- [5] T. Altan and A. E. Tekkaya, Eds., *Sheet Metal Forming: Fundamentals*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2012.
- [6] Serope Kalpakjian, *Manufacturing Engineering and Technology*. Addison-Wesley Publishing Company, 2014.
- [7] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering an Introduction*. John Wiley & Sons, Inc, 2014.
- [8] JIS – Japanese Industrial Standard, *JIS G 4304:2012: Hot-rolled stainless steel plate, sheet and strip*. Translated and Published by Japanese Standards Association 2015.
- [9] <https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas304-304L.pdf>
- [10] G. Gadachetty, A. Pandey, and M. Gawture, “On practical implementation of the Ramberg-Osgood model for FE simulation,” *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 9, no. 1, pp. 200–205, 2016, doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-9086>.
- [11] <https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials>
- [12] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ramberg%E2%80%93Osgood\\_relationship](https://en.wikipedia.org/wiki/Ramberg%E2%80%93Osgood_relationship)
- [13] <https://learnfea.com/stress-strain-curve-approximation-2>
- [14] T.T. Nguyễn, *Lý thuyết biến dạng dẻo kim loại*. Hà Nội: Nhà xuất bản Giáo dục, 2004.
- [15] C. D. Lê, *Vật liệu học*. Hà Nội: Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2000.
- [16] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2020.
- [17] Nguyễn Hoàn Sơn, *Cơ tính vật liệu*. Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội, 2002.

## ABSTRACT

### SIMULATION STUDY OF STRESS-STRAIN CURVE OF STAINLESS STEEL SUS304

Phan Nhat Tuan<sup>1</sup>, Vo Tuyen<sup>2\*</sup>, Dang Van Hai<sup>2</sup>, Trinh Tien Tho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Center for Vocational Education-Continuing Education District 10, Ho Chi Minh City*

<sup>2</sup> *Faculty of Mechanical Engineering, Ho Chi Minh City University of Industry and Trade*

\*Email: tuyenv@huit.edu.vn

SUS304 is a type of stainless steel (also known as inox) which is a very popular and widely used material in the world today. SUS304 has many outstanding advantages such as good corrosion resistance, high durability, easy processing, high aesthetics and safety for health. Therefore, this material is used in most applications in all fields such as food, medicine, architectural works, etc. In this study, the stress-strain curve of SUS304 stainless steel was simulated. From there, it shows how SUS304 stainless steel reacts under load and provides important information about its tensile strength, hardness, plastic deformation ability and resistance to destruction. The simulation results indicate that (1) The initial slope of the stress-strain curve indicates the stiffness of the material, i.e., the ability to resist initial deformation under load; (2) The point on the stress-strain curve where the material begins to deform permanently is the yield strength; (3) The highest point on the stress-strain curve indicates the maximum tensile strength of the material before it begins to contract and eventually fracture; (4) The distance from the yield point to the fracture point indicates the plastic deformation ability of the SUS304 material, and (5) The stress-strain curve ends at the fracture point, indicating the ultimate load-bearing capacity of the material.

*Keywords:* Simulation, SUS304, stress-strain curve, Ramberg-Osgood equation.