

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

**BÁO CÁO TỔNG KẾT**  
**ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG**

**TÍNH TOÁN THIẾT KẾ, CHẾ TẠO THIẾT BỊ ĐO**  
**CHUYỂN VỊ CỦA CHI TIẾT CHỊU UỐN PHỤC VỤ GIẢNG**  
**DẠY THÍ NGHIỆM CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO MÁY**

**Mã số: T2022-06-10**

**Chủ nhiệm đề tài : TS. Bùi Hệ Thống**

**Đơn vị : Khoa Cơ khí**

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

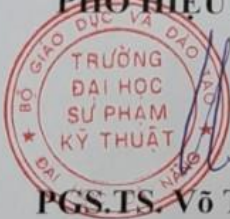
**BÁO CÁO TỔNG KẾT**  
**ĐỀ TÀI KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TRƯỜNG**

**TÍNH TOÁN THIẾT KẾ, CHẾ TẠO THIẾT BỊ ĐO**  
**CHUYỂN VỊ CỦA CHI TIẾT CHỊU UỐN PHỤC VỤ GIẢNG**  
**DẠY THÍ NGHIỆM CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO MÁY**

**Mã số: T2022-06-10**

Xác nhận của cơ quan chủ trì đề tài

**KT. HIỆU TRƯỞNG**  
**PHÓ HIỆU TRƯỞNG**



**PGS.TS. Võ Trung Hùng**

Chủ nhiệm đề tài

**TS. Bùi Hệ Thống**

**DANH SÁCH THÀNH VIÊN THAM GIA NGHIÊN CỨU**

<b>STT</b>	<b>Họ và tên</b>	<b>Đơn vị công tác và lĩnh vực chuyên môn</b>
1	TS. Phan Nguyễn Duy Minh	Khoa Cơ khí – Kỹ thuật Cơ khí

# MỤC LỤC

MỤC LỤC .....	i
DANH MỤC HÌNH ẢNH.....	iii
DANH MỤC BẢNG BIỂU.....	v
MỞ ĐẦU .....	1
1. Tổng quan tình hình nghiên cứu .....	1
1.1. Ngoài nước .....	1
1.2. Trong nước.....	1
2. Tính cấp thiết.....	1
3. Mục tiêu đề tài.....	1
4. Cách tiếp cận .....	2
5. Phương pháp nghiên cứu.....	2
6. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	2
6.1. Đối tượng nghiên cứu:.....	2
6.2. Phạm vi nghiên cứu: .....	2
<b>CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU CỦA ĐỀ TÀI .....</b>	<b>3</b>
1.1 . Tổng quan .....	3
1.2 . Cơ sở lý thuyết tính toán chuyên vị của dầm chịu uốn .....	7
1.3 . Kết luận, mục tiêu và cách tiếp cận nghiên cứu .....	9
<b>CHƯƠNG 2. TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT DỰA TRÊN CÁC MÔ HÌNH 2 CHIỀU (2D) .....</b>	<b>10</b>
2.1. Xây dựng mô hình tính toán phân tích cho dầm chịu uốn .....	10
2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn trong tính toán phân tích dầm chịu uốn .....	12
2.3. Ứng dụng tính toán cho mô hình toán cụ thể .....	13
2.4 . Kết quả, phân tích và kết luận .....	15
<b>CHƯƠNG 3. MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG SỐ SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN .....</b>	<b>16</b>
3.1. Xây dựng mô hình 3 chiều cho thiết bị đo chuyên vị của dầm chịu uốn .....	16
3.1.1. Giới thiệu sơ lược về mô hình thiết bị được chế tạo .....	16
3.1.1. Thiết kế khung đỡ .....	17
3.1.2. Thiết kế ray trượt.....	18
3.1.3. Thiết kế khối đặt tải .....	20
3.1.4. Thiết kế gối đỡ .....	21
3.1.5. Dụng cụ đo độ võng .....	22
3.2. Mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn .....	23
3.2.1. Mô phỏng số bài toán dầm chịu uốn 2D sử dụng phần mềm ABAQUS® .....	23
3.2.2. Mô phỏng số bài toán dầm chịu uốn 3D sử dụng phần mềm ABAQUS® .....	29

3.3. Đánh giá và so sánh các kết quả với phương pháp tính toán phân tích.....	34
3.3.1. Lập bảng so sánh.....	34
3.3.2. Đánh giá .....	34
3.4. Kết luận.....	35
<b>CHƯƠNG 4. CHẾ TẠO THIẾT BỊ, THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ</b>	<b>36</b>
4.1. Chế tạo và lắp ráp mô hình.....	36
4.1.1. Chế tạo khung đỡ .....	36
4.1.2. Chế tạo ray trượt .....	40
4.1.3. Thiết kế khối đặt tải .....	43
4.1.4. Chế tạo gối đỡ .....	45
4.1.5. Lắp ráp máy hoàn chỉnh.....	47
4.2. Thực nghiệm xác định độ võng .....	48
4.2.1. Vật mẫu thí nghiệm.....	48
4.2.2. Tiến hành thí nghiệm: .....	49
4.2.3. Kết quả thực nghiệm xác định độ võng .....	51
4.3. Đánh giá, so sánh kết quả .....	51
4.3.1. Lập bảng so sánh.....	51
4.3.2. Đánh giá .....	52
4.4. Kết luận và hướng phát triển của đề tài.....	54
TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	56

Thuyết minh đề tài KH-CN
Hợp đồng triển khai đề tài
Phụ lục hợp đồng
Đơn đề nghị gia hạn thời gian thực hiện đề tài KH-CN cấp trường
Báo cáo tình hình thực hiện đề tài KH-CN cấp trường
Phụ lục Hợp đồng lần 2 (Hợp đồng gia hạn)
Bảng Mục lục minh chứng sản phẩm của đề tài
Bộ minh chứng sản phẩm của đề tài

## DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1 Mô hình uốn 3 điểm (a) và 4 điểm (b) trên máy kéo nén vạn năng INSTRON 3	
Hình 1.2 Mối quan hệ giữa lực và chuyển vị trong thí nghiệm uốn 3 điểm .....	4
Hình 1.3 Cấu trúc tổ ong hình lục giác (a) và tổ ong tái nhập (b) .....	4
Hình 1.4 Mô hình thực nghiệm (a) và mô hình phần tử hữu hạn (b). .....	5
Hình 1.5 Kết quả quan hệ giữa lực và chuyển vị và các bố trí thí nghiệm dầm thép .....	5
Hình 1.6 Mô hình thí nghiệm để đo chuyển vị sử dụng tương quan ảnh (DIC) và camera .....	5
Hình 1.7 Mô hình thí nghiệm đo chuyển vị của dầm bê tông cốt thép (a) và dầm thép (b) .....	6
Hình 1.8 Một số loại máy kéo nén vạn năng được sử dụng .....	7
Hình 1.9 Các thiết bị đo độ võng đơn giản sử dụng đồng hồ so .....	7
Hình 1.10 Thanh chịu uốn trước và sau biến dạng: (a) trước biến dạng; (b) uốn thuần tuý phẳng; (c) uốn ngang phẳng. ....	8
Hình 1.11 (a) Biểu đồ nội lực của dầm chịu uốn; (b) dầm chịu uốn thuần tuý phẳng....	8
Hình 1.12 Dầm chịu uốn thuần ngang phẳng .....	9
Hình 2.1 Dầm chịu uốn ngang phẳng được ngàm 1 đầu và 1 đầu chịu tải tập trung...10	
Hình 2.2 Mô hình biến dạng của dầm chịu uốn 3 điểm .....	11
Hình 2.3 Rời rạc miền tính toán .....	12
Hình 2.4 (a) Sơ đồ hoá dầm chịu uốn; (b) Biến dạng của trục dầm .....	13
Hình 2.5 Tính dầm chịu uốn bằng phương pháp phần tử hữu hạn .....	14
Hình 3.1 (a) Sơ đồ thiết bị kiểm tra và (b) Mô hình CAD 3D .....	17
Hình 3.2 Mô hình CAD 3D khung đỡ .....	17
Hình 3.3 Mô hình CAD 3D của ray trượt.....	18
Hình 3.4 Mô hình CAD 3D khối đặt tải.....	20
Hình 3.5 Mô hình CAD 3D hai gối đỡ .....	21
Hình 3.6 Bộ đồng hồ so để đo chuyển vị trong thí nghiệm .....	22
Hình 3.7 Tạo mô hình dầm chịu uốn 2D trong phần mềm Abaqus® .....	24
Hình 3.8 Đặt thuộc tính vật liệu cho dầm .....	24
Hình 3.9 Tạo lắp ráp cho dầm chịu uốn 2D.....	25
Hình 3.10 Tạo bước cho tính toán dầm chịu uốn 2D .....	25
Hình 3.11 Xác định vị trí tải trọng tập trung đối với dầm chịu uốn 2D.....	26
Hình 3.12 Thiết lập điều kiện biên đối với dầm 2D .....	26
Hình 3.13 Mô hình chia lưới với phần tử kích thước 1mm đối với dầm 2D .....	27
Hình 3.14 Độ võng lớn nhất U2 đối với dầm $d=6\text{mm}$ chịu tải 50N trong FEM 2D .....	28
Hình 3.15 Tạo mô hình dầm chịu uốn 3D trong phần mềm Abaqus® .....	29
Hình 3.16 Đặt thuộc tính vật liệu cho dầm .....	30

<i>Hình 3.17 Tạo lớp gổì đỡ cho dầm 3D</i> .....	30
<i>Hình 3.18 Thiết lập môi trường tính toán cho dầm chịu uốn 3D</i> .....	31
<i>Hình 3.19 Đặt tải trọng tập trung cho dầm chịu uốn 3D</i> .....	31
<i>Hình 3.20 Thiết lập điều kiện biên đối với dầm chịu uốn 3D</i> .....	32
<i>Hình 3.21 Phân tử hữu hạn mô hình (lưới) với phần tử kích thước 1mm đối với dầm chịu uốn 3D (<math>d=10\text{ mm}</math>)</i> .....	33
<i>Hình 3.22 Độ võng lớn nhất <math>U_2</math> đối với dầm <math>d=6\text{ mm}</math> chịu tải 50N trong FEM 3D</i> .....	33
<i>Hình 4.1 Khung đỡ chính của thiết bị</i> .....	36
<i>Hình 4.2 Thanh chịu tải</i> .....	37
<i>Hình 4.3 Máy phay đứng 6H11</i> .....	38
<i>Hình 4.4 Mô hình chế tạo của ray trượt</i> .....	40
<i>Hình 4.5 Tấm ray tùy động</i> .....	41
<i>Hình 4.6 Mô hình chế tạo khối đặt tải</i> .....	43
<i>Hình 4.7 Gổì đặt lực</i> .....	44
<i>Hình 4.8 Mô hình chế tạo gổì đỡ</i> .....	45
<i>Hình 4.9 Thiết bị đo chuyển vị của dầm chịu uốn</i> .....	48
<i>Hình 4.10 Dầm nhôm A6061</i> .....	48
<i>Hình 4.11 Thực nghiệm trên thiết bị thực tế</i> .....	50
<i>Hình 4.12 Độ dịch chuyển của mẫu có đường kính = 6 mm (a) và đường kính = 8 mm (b)</i> .....	53
<i>Hình 4.13 Độ dịch chuyển của mẫu có đường kính = 10 mm</i> .....	54

## DANH MỤC BẢNG BIỂU

<i>Bảng 2. 1 Kết quả tính toán cho một số trường hợp .....</i>	<i>15</i>
<i>Bảng 3. 1 Kết quả chuyển vị của dầm sử dụng FEM mô hình 2D .....</i>	<i>28</i>
<i>Bảng 3. 2 So sánh kết quả mô phỏng số với phương pháp tính toán phân tích .....</i>	<i>34</i>
<i>Bảng 3. 3 Đánh giá sai số của các phương pháp tính toán và mô phỏng số .....</i>	<i>35</i>
<i>Bảng 4. 1 Thông số kỹ thuật của máy phay 6H11 .....</i>	<i>37</i>
<i>Bảng 4. 2 Các đặc tính cơ lý của A6061 .....</i>	<i>48</i>
<i>Bảng 4. 3 Kết quả thực nghiệm của dầm nhôm.....</i>	<i>51</i>
<i>Bảng 4. 4 Kết quả chuyển vị tính toán, mô phỏng và thực nghiệm của dầm nhôm tiết diện tròn (mm) .....</i>	<i>51</i>



## THÔNG TIN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 1. Thông tin chung:

- Tên đề tài: **Tính toán thiết kế, chế tạo thiết bị đo chuyển vị của chi tiết chịu uốn phục vụ giảng dạy thí nghiệm công nghệ chế tạo máy.**

- Mã số: T2022-06-10

- Chủ nhiệm: TS. Bùi Hệ Thống

- Thành viên tham gia: TS. Phan Nguyễn Duy Minh

- Cơ quan chủ trì: Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật

- Thời gian thực hiện: 3/2023 – 5/2024

### 2. Mục tiêu:

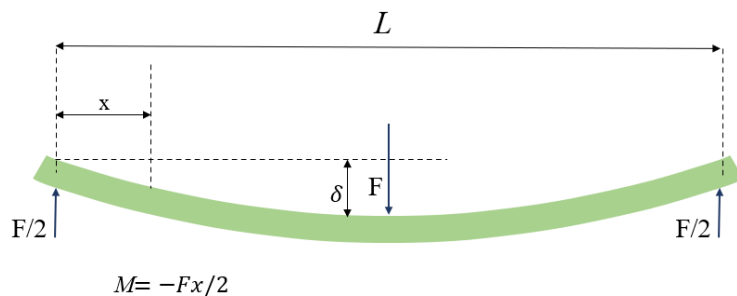
Mục tiêu của đề tài là nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thiết bị đo chuyển vị của chi tiết chịu uốn phục vụ giảng dạy học phần thí nghiệm Công nghệ chế tạo máy cho sinh viên ngành Công nghệ kỹ thuật Cơ khí, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật. Trên cơ sở ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán mô hình hoá và mô phỏng số nhằm xác độ võng của chi tiết và tiến hành tra độ võng bằng phương pháp thực nghiệm để so sánh, đánh giá kết quả thực hiện.

### 3. Tính mới và sáng tạo:

Tính toán độ võng của dầm (chi tiết máy) chịu uốn là cần thiết để đảm bảo độ an toàn và thường được thực hiện theo phương pháp lý thuyết sử dụng các tính toán như cơ học vật rắn biến dạng, sức bền vật liệu..., đối với các bài toán phức tạp người ta thường sử dụng các phương pháp số hoặc phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán kết quả gần đúng... Mặc dù vậy, cần thiết phải tiến hành kiểm tra, so sánh đánh giá bằng kết quả thực nghiệm để kiểm chứng các kết quả tính toán đạt được từ lý thuyết. Tuy nhiên, việc này thường ít được thực hiện, do phần lớn là không có thiết bị, hoặc thiết bị quá đắt tiền, hoặc thiết bị không phù hợp đối với các lĩnh vực riêng biệt... Xuất phát từ các yếu tố trên, nhóm nghiên cứu đề xuất đề tài: “Tính toán thiết kế, chế tạo thiết bị đo chuyển vị của chi tiết chịu uốn phục vụ giảng dạy thí nghiệm Công nghệ Chế tạo máy” làm cơ sở phục vụ cho công tác giảng dạy tại Bộ môn Cơ khí Chế tạo – Khoa Cơ khí – Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật.

### 4. Tóm tắt kết quả nghiên cứu:

- Nghiên cứu tổng quan về thiết bị đo chuyển vị của dầm chịu uốn, tiếp đến dựa trên cơ sở của cơ học vật rắn biến dạng để tính toán lý thuyết với các mô hình 2 chiều.



Hình 1. Mô hình lý thuyết dầm chịu uốn 3 điểm

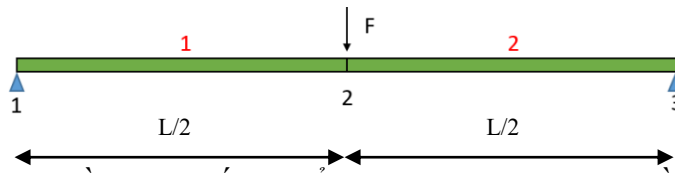
Chuyển vị của dầm được xác định:

$$y = \frac{Fx}{48EI} (3L^2 - 4x^2)$$

Chuyển vị lớn nhất tại  $x = \frac{L}{2}$ :

$$y_{max} = \delta = \frac{FL^3}{48EI}$$

- Áp dụng bài toán phần tử hữu hạn cho dầm chịu uốn 3 điểm đơn giản để xác định ma trận độ cứng và tính chuyển vị của dầm (Hình 2),



Hình 2. Dầm chịu uốn 3 điểm được chia thành 2 phần tử và 3 nút

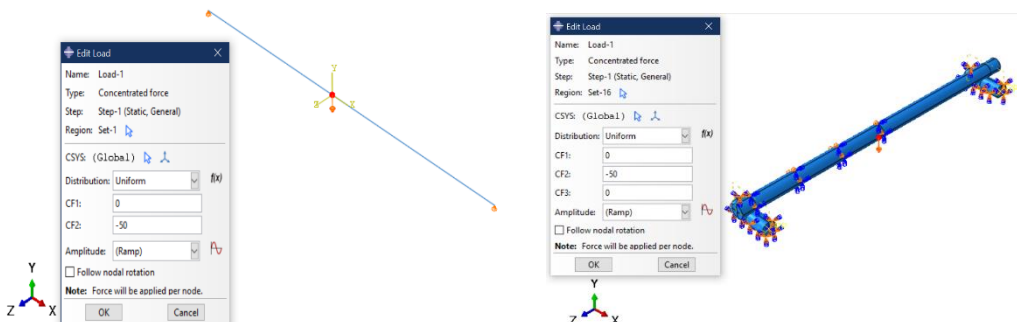
Ma trận độ cứng của mỗi phần tử như sau:

$$[k_1] = [k_2] = \frac{E.I}{\left(\frac{L}{2}\right)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6(L/2) & -12 & 6(L/2) \\ 6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 \\ -12 & -6(L/2) & 12 & -6(L/2) \\ 6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 \end{bmatrix}$$

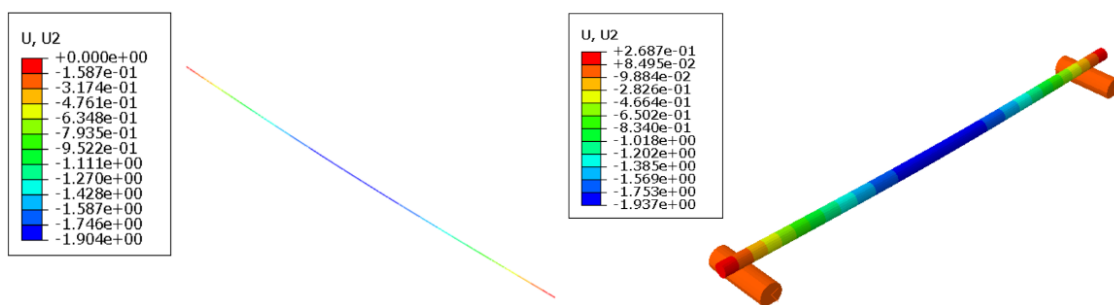
Ma trận độ cứng toàn cục của dầm:

$$[K] = \frac{E.I}{\left(\frac{L}{2}\right)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6(L/2) & -12 & 6(L/2) & 0 & 0 \\ 6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & 0 & 0 \\ -12 & -6(L/2) & 24 & 0 & -12 & 6(L/2) \\ 6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & 0 & 8\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 \\ 0 & 0 & -12 & -6(L/2) & 12 & -6(L/2) \\ 0 & 0 & 6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 \end{bmatrix}$$

- Mô hình hoá và mô phỏng số 2D và 3D để xác định chuyển vị của dầm chịu uốn 3 điểm.

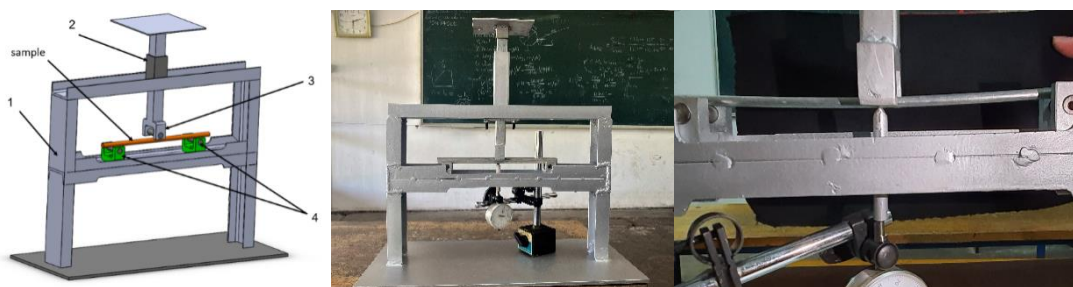


Hình 3. Mô hình phần tử dầm 2D và 3D được sử dụng để mô phỏng số



Hình 4. Kết quả mô phỏng số đạt được với mô hình 2D và 3D

- Chế tạo mô hình thiết bị và tiến hành thực nghiệm để đo độ võng trên thiết bị và đánh giá kết quả đạt được.



Hình 5. Mô hình 3D, mô hình thiết bị chế tạo và thực nghiệm đo chuyển vị trên thiết bị

Kết quả đạt được bởi các phương pháp tính toán, mô phỏng số 2D, 3D và thực nghiệm trên thiết bị được thể hiện trong bảng:

Đường kính (mm)	Tải (N)	Tính toán	Mô phỏng số		Thực nghiệm (Giá trị trung bình của 3 lần đo)
			2D	3D	
d = 6	50	1.9012	1.904	1.936	1,86
	70	2.6617	2.665	2.71	2,57
	90	3.4222	3.425	3.486	3,32
	110	4.1826	4.184	4.266	4,15
d = 8	50	0.6016	0.6037	0.5803	0,56
	70	0.8422	0.8451	0.805	0,75
	90	1.0828	1.087	1.03	0,98
	110	1.3234	1.328	1.255	1,18
d = 10	50	0.2464	0.2478	0.2406	0,25
	70	0.3450	0.3469	0.3303	0,34
	90	0.4435	0.446	0.4201	0,43
	110	0.5421	0.5451	0.5099	0,53

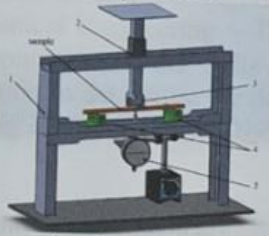
##### 5. Tên sản phẩm:

Stt	Tên sản phẩm	Số lượng
1	Bài báo trên tạp chí quốc tế có chỉ số ISSN (thuộc danh mục HĐCD GSNN)	1
2	Mô hình thiết bị đo chuyển vị của dầm chịu uốn	1
3	Báo cáo tổng kết đề tài	1

#### 6. Hiệu quả, phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu và khả năng áp dụng:

- Kết quả nghiên cứu đạt được của đề tài sẽ được sử dụng để làm tài liệu tham khảo phục vụ cho sinh viên học tập, nghiên cứu khoa học, ứng dụng tính toán phần tử hữu hạn trong lĩnh vực cơ khí. Đặc biệt, thiết bị đo chuyển vị sẽ được sử dụng cho việc giảng dạy học phần Thí nghiệm Công nghệ Chế tạo máy thuộc ngành Công nghệ Kỹ thuật Cơ khí.
- Phương thức chuyển giao kết quả nghiên cứu: Sản phẩm của đề tài được bàn giao trực tiếp cho Bộ môn Cơ khí Chế tạo, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật.
- Ứng dụng để giảng dạy Thực hành Công nghệ Chế tạo máy, chuyên ngành Cơ khí Chế tạo, Khoa Cơ khí với khoảng hơn 120 lượt sinh viên tham gia học tập/năm; Địa chỉ ứng dụng: 48 Cao Thắng, Hải Châu, Đà Nẵng.

#### 7. Hình ảnh, sơ đồ minh họa chính



Hình 6. Mô hình thiết kế 3 chiều và mô hình sản phẩm thiết bị thực tế được chế tạo của đề tài

Hội đồng Khoa  
Chủ tịch  
(ký, họ và tên)

TS. Hồ Trần Anh Ngọc

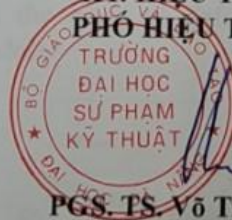
Ngày 30 tháng 06 năm 2024

Chủ nhiệm đề tài  
(ký, họ và tên)

TS. Bùi Hệ Thống

XÁC NHẬN CỦA TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT

KT. HIỆU TRƯỞNG  
PHÓ HIỆU TRƯỞNG



PGS. TS. Võ Trung Hùng

## INFORMATION ON RESEARCH RESULTS

### 1. General information:

Project title: Calculate, design and manufacture equipment to measure displacement of 3-point bending for teaching manufacturing technology experimental module.

Code number: T2022-06-10

Coordinator: PhD. BUI HE THONG

Implementing institution: University of Technology and Education

Duration: from 3/2023 to 5/2024

### 2. Objective(s):

The objective of the project is to research, design and manufacture an equipment to measure displacement of 3-point bending for teaching manufacturing technology experimental module for students majoring at **Division of Mechanical Engineering - Faculty of Mechanical Engineering – The University of Technology and Education**. Based on the application of the finite element method to calculate modeling and numerical simulation to determine the deflection of the beam and behavior deflection investigation using experimental methods to compare and evaluate the performance results.

### 3. Creativeness and innovativeness:

Calculating the deflection of the beam to bending is necessary to ensure safety and is usually performed according to theoretical methods using calculations such as deformable solid mechanics, material strength..., for complex problems, people often use numerical methods or finite element methods to calculate approximate results... However, it is necessary to conduct tests and compare and evaluate the results. The experimental results to verify the calculation results obtained from theory. However, this work is rarely realizing, because there is no equipment, or the equipment is too expensive, or the equipment is not suitable for specific fields... Based on the above factors, the research team proposed the project: "Calculate, design and manufacture equipment to measure displacement of 3-point bending for teaching manufacturing technology experimental module" for teaching at Division of Mechanical Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - University of Technology and Education.

### 4. Research results:

- General study of displacement measurement equipment for beams subjected to bending, then based on the basis of deformable solid mechanics for theoretical calculations with 2-D models.

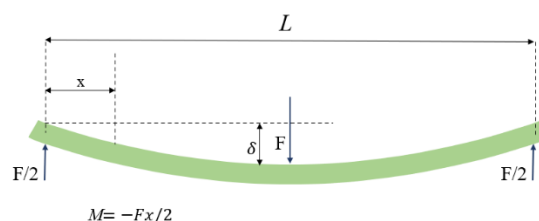


Figure 1. Deformation model of 3-point bending beam.

+ For 3-point bending model, we calculate:

- Displacement equation:

$$y = \frac{Fx}{48EI} (3L^2 - 4x^2) \quad (1)$$

- Maximum displacement at  $x = \frac{L}{2}$ :

$$y_{max} = \delta = \frac{FL^3}{48EI} \quad (2)$$

- For 3-point bending beam, to calculate theoretically, it can be divided into 2 elements and 3 nodes is shown in figure 2.

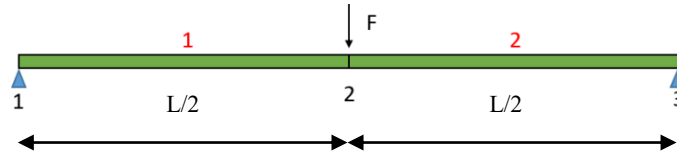


Figure 2. The beam was divided into 2 elements and 3 nodes.

- The beam was divided into 2 elements; each element has the deformation type as a cantilever beam having a stiffness  $k$ ;

+ Stiffness matrix of each element:

$$[k_1] = [k_2] = \frac{E.I}{\left(\frac{L}{2}\right)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6(L/2) & -12 & 6(L/2) \\ 6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 \\ -12 & -6(L/2) & 12 & -6(L/2) \\ 6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 \end{bmatrix}$$

+ Global stiffness matrix:

$$[K] = \frac{E.I}{\left(\frac{L}{2}\right)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6(L/2) & -12 & 6(L/2) & 0 & 0 \\ 6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & 0 & 0 \\ -12 & -6(L/2) & 12 & -6(L/2) & -12 & 6(L/2) \\ 6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & 0 & 8\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 \\ 0 & 0 & -12 & -6(L/2) & 12 & -6(L/2) \\ 0 & 0 & 6(L/2) & 2\left(\frac{L}{2}\right)^2 & -6(L/2) & 4\left(\frac{L}{2}\right)^2 \end{bmatrix}$$

- The 2D and 3D numerical modeling and simulation to determine the displacement of beams subjected to 3-point bending.



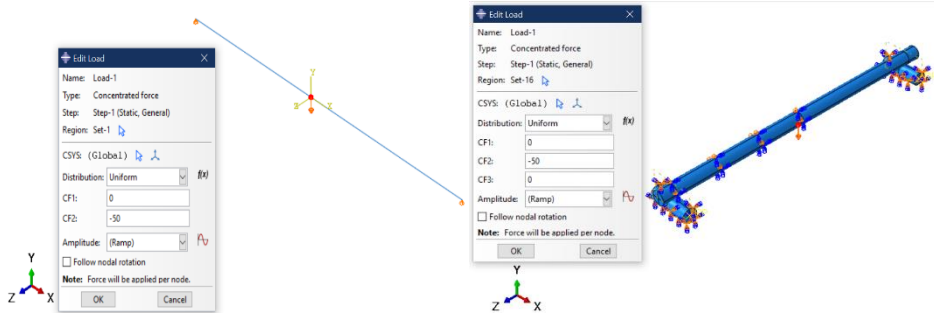


Figure 3. 2D and 3D model of beam for simulation numerical

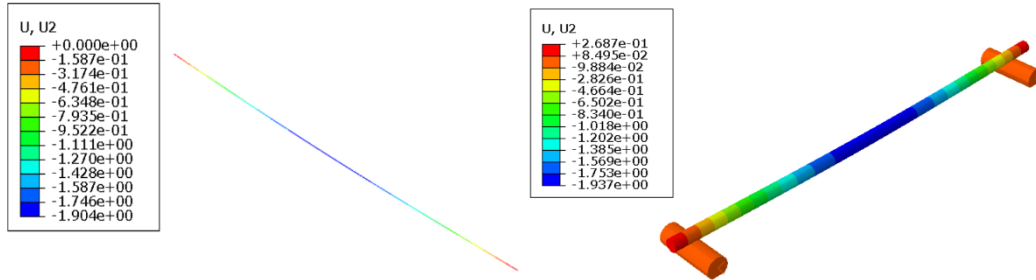


Figure 4. 2D and 3D simulation results for displacement of beam circle

- Fabrication a device model and conduct experiments to measure deflection on the device and evaluate the results.

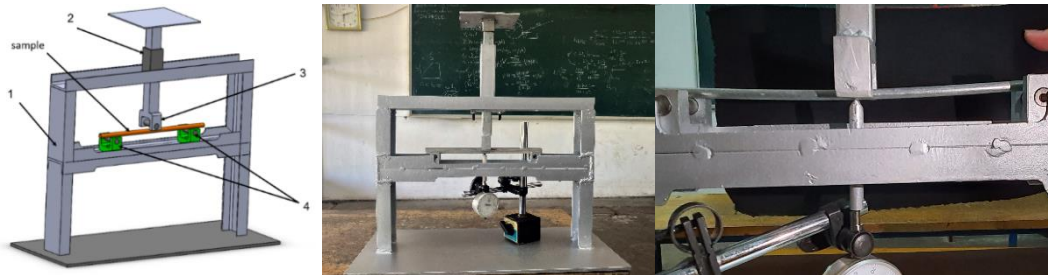


Figure 5. 3D model, manufacturing device model and experiment in measuring displacement on the device

The results obtained by calculation methods, 2D and 3D numerical simulations and experiments on the device are shown in the table:

Diameter (mm)	Load (N)	Calculation	Simulation		Experimental (Average result of three measurements)
			2D	3D	
d = 6	50	1.9012	1.904	1.936	1,86
	70	2.6617	2.665	2.71	2,57
	90	3.4222	3.425	3.486	3,32
	110	4.1826	4.184	4.266	4,15
d = 8	50	0.6016	0.6037	0.5803	0,56
	70	0.8422	0.8451	0.805	0,75
	90	1.0828	1.087	1.03	0,98
	110	1.3234	1.328	1.255	1,18
d = 10	50	0.2464	0.2478	0.2406	0,25
	70	0.3450	0.3469	0.3303	0,34
	90	0.4435	0.446	0.4201	0,43
	110	0.5421	0.5451	0.5099	0,53

**5. Products:**

No.	Product name	Quantity
1	The journal article with ISSN index	1
2	Model of device for measuring displacement of 3-point blending.	1
3	Project report	1

**6. Effects, transfer alternatives of research results and applicability:**

- The research results of the project will be used as reference materials to serve students in studying, scientific research and applying finite element calculations in the field of mechanical engineering. In particular, the model of device for measuring displacement of 3-point blending serving for teaching at Division of Mechanical Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - University of Technology and Education.

- Application for teaching module: “manufacturing technology experimental” for students majoring at **Division of Mechanical Engineering** - Faculty of Mechanical Engineering – The University of Technology and Education with more than 120 students participating in learning/year.

- Application address: 48 Cao Thang, Hai Chau, Da Nang.



# MỞ ĐẦU

## 1. Tổng quan tình hình nghiên cứu

### 1.1. Ngoài nước

Tình hình nghiên cứu trên thế giới liên quan đến lĩnh vực xác định chuyển vị của các chi tiết máy (dầm, giàn, khung) chịu uốn đã được tập trung nghiên cứu đánh giá từ mô hình tính toán, đến mô phỏng số và thực nghiệm. Trong thời gian gần đây một phương pháp thực nghiệm mới được phát triển khá nổi bật để xác định chuyển vị của các kết cấu, dầm, chi tiết máy chịu uốn đó là phương pháp tương quan ảnh số (DIC), trước kia người ta thường sử dụng đồng hồ so làm phương pháp thực nghiệm để đo chuyển vị này. Đây là hai hướng nghiên cứu thực nghiệm mà đề tài sẽ hướng tới để kiểm tra đánh giá và so sánh với kết quả tính toán phân tích, cũng như từ mô phỏng số.

### 1.2. Trong nước

Hiện tại trong nước tình hình nghiên cứu thuộc lĩnh vực của đề tài vẫn còn khá mới mẻ, không có nhiều các nghiên cứu khoa học được công bố liên quan đến vấn đề nghiên cứu được đề xuất. Phần lớn các thiết bị sử dụng để xác định chuyển vị chủ yếu được nhập khẩu từ nước ngoài với giá thành cao. Một số nghiên cứu được công bố liên quan đến việc xác định chuyển vị của các kết cấu trong các công trình xây dựng hoặc lĩnh vực cơ khí sử dụng phương pháp tương quan ảnh số.

## 2. Tính cấp thiết

Chế tạo thiết bị kiểm tra chuyển vị của chi tiết máy (dầm, khung, giàn) để phục vụ cho việc giảng dạy thực hành của sinh viên chuyên ngành Cơ khí Chế tạo/Ngành CNKT Cơ khí là rất cần thiết. Các loại máy thí nghiệm cỡ lớn có giá thành rất cao, điều kiện đầu tư còn gặp nhiều khó khăn. Việc chế tạo thiết bị nhỏ gọn, có giá thành thấp cần được thực hiện để phục vụ cho việc giảng dạy tại Xưởng Chế tạo thuộc khoa Cơ khí – Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng.

## 3. Mục tiêu đề tài

Mục tiêu của đề tài là nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thiết bị đo chuyển vị của chi tiết chịu uốn phục vụ giảng dạy học phần thí nghiệm Công nghệ chế tạo máy cho sinh viên ngành Công nghệ kỹ thuật Cơ khí, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật.

Trên cơ sở ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán mô hình hoá và mô phỏng nhằm xác độ võng của chi tiết và tiến hành tra độ võng bằng phương pháp thực nghiệm để so sánh, đánh giá kết quả thực hiện.

#### **4. Cách tiếp cận**

Dựa trên cơ sở của các bài toán sức bền vật liệu, cơ học vật rắn biến dạng đã biết, tiến hành tính toán và kiểm chứng với kết quả tính toán bằng phương pháp số (sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn) ... rồi tiến hành thiết kế và chế tạo mô hình máy, tiến hành thử nghiệm để đánh giá kết quả.

#### **5. Phương pháp nghiên cứu**

- Nghiên cứu lý thuyết tính toán bằng các phương pháp như phương pháp tính toán phân tích chính xác.
- Tính toán gần đúng sử dụng các phương pháp số (phương pháp phần tử hữu hạn...).
- Kiểm chứng bằng các mô hình mô phỏng số sử dụng phần mềm Abaqus®
- Cuối cùng là chế tạo mô hình thiết bị và tiến hành thực nghiệm để kiểm tra và đánh giá kết quả.

#### **6. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

##### 6.1. Đối tượng nghiên cứu:

Thiết bị đo chuyển vị của chi tiết chịu uốn

##### 6.2. Phạm vi nghiên cứu:

Tính toán phân tích phần tử hữu hạn đến mô hình hoá, mô phỏng số sử dụng phần mềm Abaqus® và chế tạo mô hình.

## CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU CỦA ĐỀ TÀI

Nội dung của chương này, chúng tôi sẽ giới thiệu tổng quan về các nghiên cứu thuộc lĩnh vực của đề tài, cơ sở lý thuyết tính toán chuyển vị của dầm chịu uốn và cuối cùng là mục tiêu và cách tiếp cận nghiên cứu.

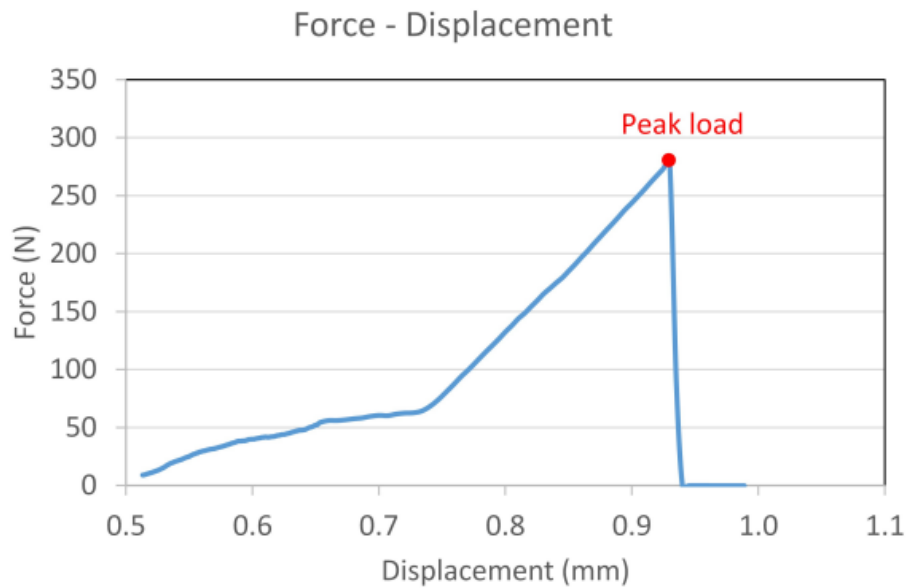
### 1.1 . Tổng quan

Vấn đề xác định chuyển vị của các chi tiết máy (dầm, giàn, khung) chịu uốn ngang phẳng được thực hiện dưới nhiều cách thức khác nhau từ mô hình tính toán lý thuyết, đến mô phỏng số và thực nghiệm được thể hiện trong các nghiên cứu trong và ngoài nước [1-5]. Trong đó một số nghiên cứu mô hình hoá và mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua bài toán uốn ngang phẳng 3 điểm, 4 điểm... các phương pháp thực nghiệm được sử dụng để đánh giá kiểm chứng kết quả mô phỏng số nhờ các thiết bị đo sử dụng cảm biến hoặc đồng hồ so. Trong thời gian gần đây một phương pháp thực nghiệm mới được phát triển khá nổi bật để xác định chuyển vị của các kết cấu, dầm, chi tiết máy chịu uốn đó là phương pháp tương quan ảnh số (DIC) [1, 6-7].



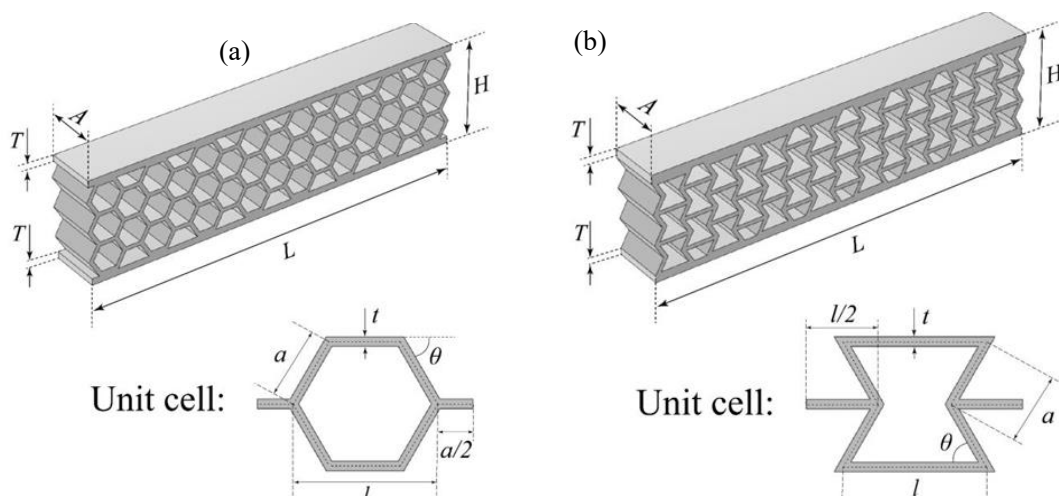
Hình 1.1 Mô hình uốn 3 điểm (a) và 4 điểm (b) trên máy kéo nén vạn năng INSTRON [8]

Phương pháp đo chuyển vị của dầm chịu uốn ngang phẳng được thực hiện trên máy kéo nén vạn năng (hình 1.1) thường tự động xác định chuyển vị thông qua cảm biến kết nối với phần mềm được kết nối với máy tính và kết quả thực nghiệm sẽ cho kết quả đo được thông qua mối quan hệ như lực – chuyển vị, ứng suất – biến dạng...



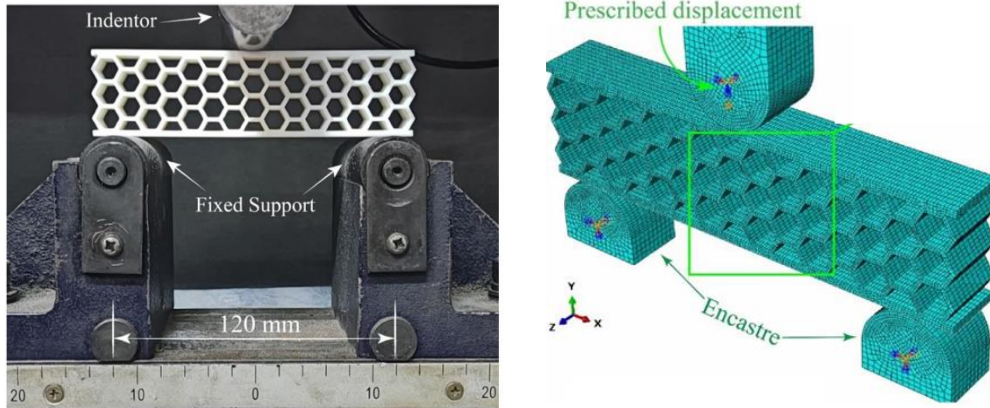
Hình 1. 2 Mối quan hệ giữa lực và chuyển vị trong thí nghiệm uốn 3 điểm [9]

Một số nghiên cứu đã thực hiện việc đánh giá để tối ưu hoá cấu trúc của vật liệu sử dụng trong các công trình bằng phương pháp mô phỏng số và thực nghiệm uốn 3 điểm. Nghiên cứu của A. Montazeri và các cộng sự [10], đã nghiên cứu đánh giá hiệu suất của cấu trúc ống hình lục giác (hình 1.3b) và ống tái nhập (hình 1.3 b) dựa trên 2 loại vật liệu PLA và TPU được sản xuất bổ sung dưới tải trọng uốn ngang phẳng thông qua thử nghiệm uốn ba điểm và mô hình phân tích phần tử hữu hạn.



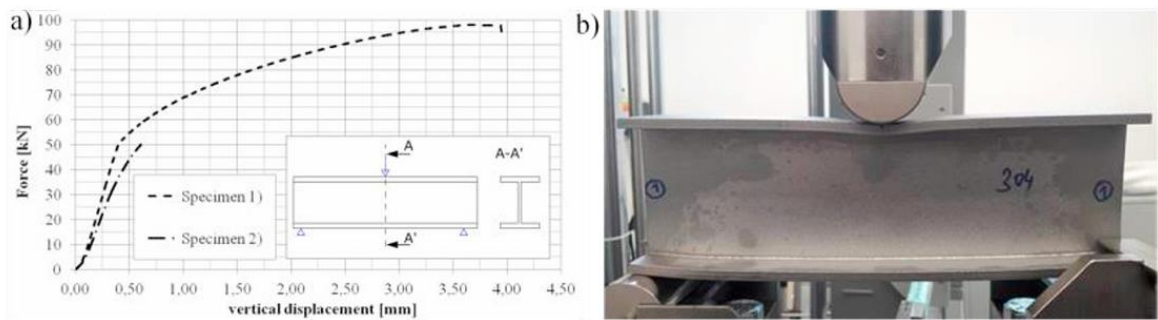
Hình 1. 3 Cấu trúc ống hình lục giác (a) và ống tái nhập (b)

Mô hình mô phỏng số và chế tạo mẫu để thực hiện thí nghiệm được nhóm tác giả thể hiện ở hình 1.4 [10].



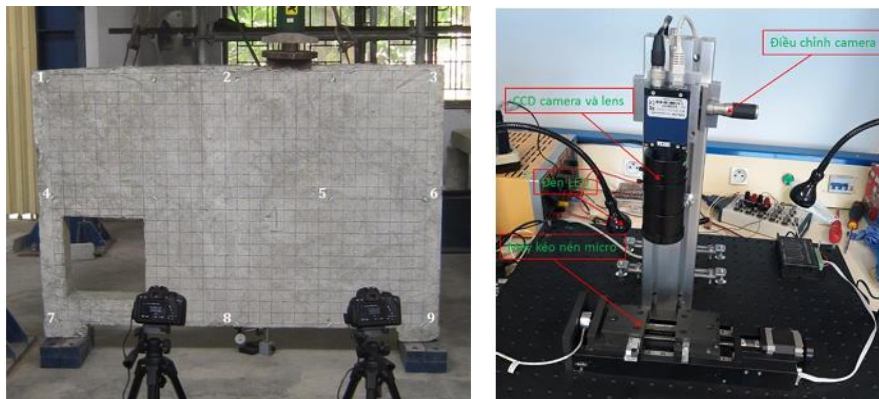
Hình 1. 4 Mô hình thực nghiệm (a) và mô hình phần tử hữu hạn (b).

Mô phỏng số và thực nghiệm đã được D. Jindra và các cộng sự, [11] thực hiện với phương pháp uốn ba điểm đối với dầm thép không gi chữ I để đánh giá kết quả giữa 2 phương pháp này (hình 1.5).



Hình 1. 5 Kết quả quan hệ giữa lực và chuyển vị và các bố trí thí nghiệm dầm thép

Một số nghiên cứu trong những năm gần đây sử dụng phương pháp tương quan ảnh số (DIC), phương pháp điểm ảnh hoặc sử dụng Camera để xác định chuyển vị của chi tiết chịu kéo, dầm hoặc kết cấu chịu uốn phẳng. Các nghiên cứu của nhóm tác giả Trương Hoài Chính và cộng sự... [7], tác giả Tào Quang Bảng et cộng sự... [6].



Hình 1. 6 Mô hình thí nghiệm để đo chuyển vị sử dụng tương quan ảnh (DIC) và camera

Tác giả Nguyễn Trọng Phú và cộng sự... [11], đã sử dụng những phương pháp xác định chuyển vị của dầm chịu uốn bằng đồng hồ so (hình 1.7)



Hình 1. 7 Mô hình thí nghiệm đo chuyển vị của dầm bê tông cốt thép (a) và dầm thép (b)

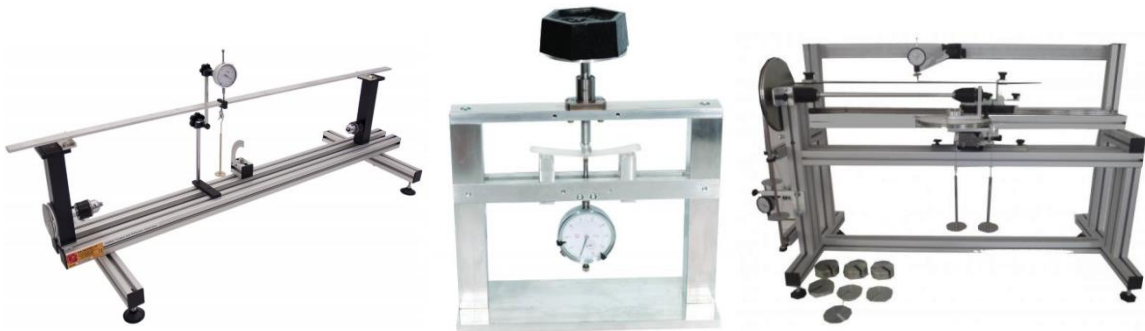
Thiết bị sử dụng để xác định chuyển vị (độ võng) đối với chi tiết máy hoặc dầm trong lĩnh vực cơ khí chế hay xây dựng thường là các loại máy kéo nén vạn năng với kích thước và chủng loại khác nhau có nguồn gốc xuất xứ từ nhiều nước trên thế giới. Thiết bị này thường được gọi là máy kéo nén vạn năng (Universal Testing Machine) còn được gọi là: máy đo lực kéo đứt - máy đo độ bền kéo (tensile machine), trong các phòng thử nghiệm đo cơ tính của thép còn gọi là máy kéo thép. Vì có tính vạn năng nên các loại máy này thường có chức năng nén (ép) để thực hiện các thí nghiệm uốn nhằm mục đích đo độ võng (chuyển vị theo phương thẳng đứng) [13-14]. Các loại máy này được ứng dụng rộng rãi, để xác định độ bền kéo (tensile), uốn (bending), nén (compress) đối với các chi tiết máy (dầm) được chế tạo từ nhiều loại vật liệu khác nhau như: sắt, thép, cao su, vải, da giày, nhựa – composite... Theo thống kê hiện nay trên thế giới có hơn 200 nhà sản xuất máy kéo nén vạn năng đến từ nhiều nước khác nhau. Tại Việt Nam, các hãng sản xuất máy kéo nén có chất lượng cao thường được sử dụng như: Zwick Roell, Tinius Olsen, Instron, WANCE, MTS, ADMET, COMETECH, GALDABINI...[13]. Giá thành của các loại máy kéo nén vạn năng kể trên tùy thuộc vào khả năng tải cho phép được thiết kế chế tạo, có thể dao động từ vài chục triệu đồng đến vài tỷ đồng.





*Hình 1.8 Một số loại máy kéo nén vạn năng được sử dụng*

Để giảm chi phí đầu tư đối với các mô hình thực nghiệm cỡ nhỏ, người ta thường sử dụng các thiết bị đo chuyển vị (độ võng) đơn giản có kích thước nhỏ gọn sử dụng đồng hồ so để đo chuyển vị (hình 1.9). Các thiết bị này được chế tạo từ kết quả nghiên cứu với kích thước nhỏ gọn với chi phí thấp, nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy cao [15-17]. Các thiết bị này có giá thành dao động từ khoảng 40 triệu đồng đến 70 triệu đồng.



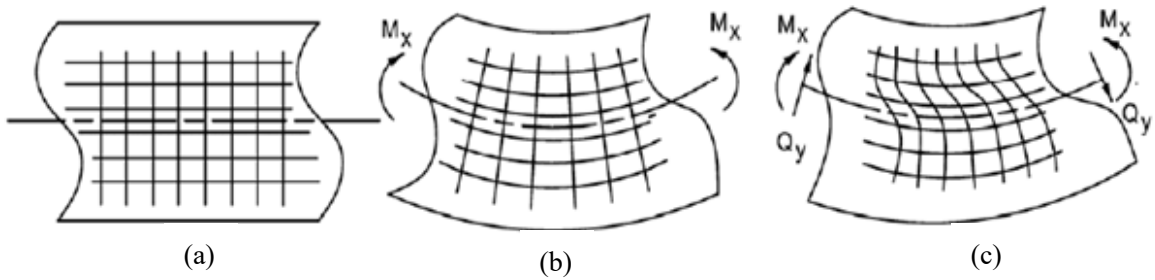
*Hình 1.9 Các thiết bị đo độ võng đơn giản sử dụng đồng hồ so*

Đây là một trong các thiết bị mà mục tiêu của đề tài hướng đến với mục đích chế tạo được thiết bị đo chuyển vị của dầm/chi tiết chịu uốn có giá thành thấp, phục vụ cho thí nghiệm và học tập của sinh viên tại Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật.

## **1.2 . Cơ sở lý thuyết tính toán chuyển vị của dầm chịu uốn**

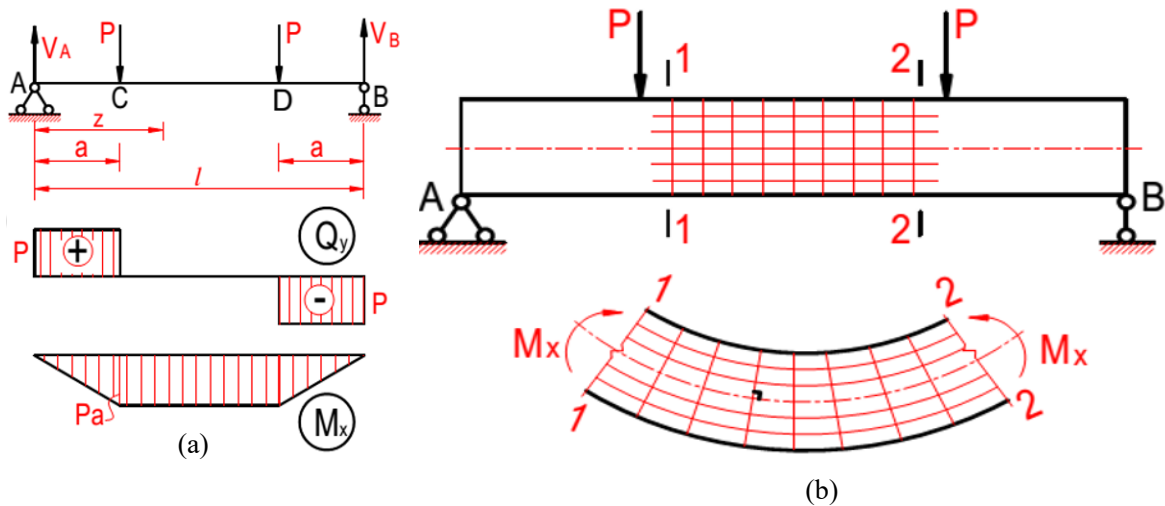
Dựa trên cơ sở của thanh chịu uốn phẳng trong lý thuyết sức bền vật liệu để xác định chuyển vị của dầm chịu uốn. Biến dạng uốn là biến dạng làm trục thanh bị cong, các thanh bị uốn thường được gọi là dầm.

Dầm chịu uốn được chia thành 2 dạng chính là: uốn thuần túy phẳng và uốn ngang phẳng.



Hình 1. 10 Thanh chịu uốn trước và sau biến dạng: (a) trước biến dạng; (b) uốn thuần túy phẳng; (c) uốn ngang phẳng.

Một thanh được gọi là uốn thuần túy phẳng khi trên mặt cắt ngang chỉ có thành phần nội lực là momen uốn khác không, các thành phần nội lực khác đều bằng 0.



Hình 1. 11 (a) Biểu đồ nội lực của dầm chịu uốn; (b) dầm chịu uốn thuần túy phẳng

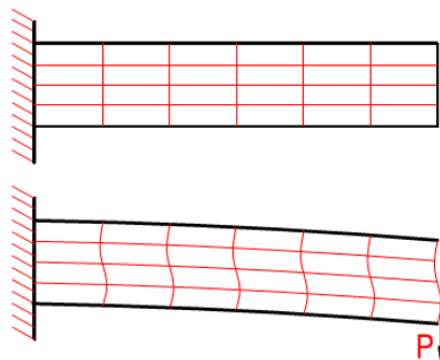
Theo lý thuyết của sức bền vật liệu chúng ta biết, một dầm chịu tải trọng như hình vẽ (hình 1.11a). Sau khi vẽ biểu đồ lực cắt  $Q(z)$  và mômen uốn  $M(z)$ , ta thấy giá trị lực cắt và mômen uốn tại một mặt cắt bất kỳ trong đoạn CD là:  $Q(z) = 0$ ;  $M(z) = P \cdot a$  luôn là hằng số. Nếu trong một đoạn dầm lực cắt bằng không và mômen uốn bằng hằng số thì người ta nói đoạn dầm đó chịu uốn thuần túy.

Có thể quan sát và thấy đối với dầm chịu uốn thuần túy phẳng (hình 1.11b), trước và sau khi biến dạng có đặc điểm sau: những đường thẳng đã vẽ vuông góc với trục thanh vẫn là đường thẳng và vuông góc với trục thanh bị uốn cong. Những đường thẳng đã kẻ song song với trục thanh trở thành những đường cong đồng dạng với trục thanh bị uốn cong.

Tuy nhiên trong thực tế, rất ít khi dầm chịu uốn thuần túy mà thường trên mặt cắt của dầm có cả mômen và lực cắt ( $M \neq 0$ ,  $Q \neq 0$ ) khi đó ta nói dầm chịu uốn ngang. Trong trường hợp này, những đường thẳng kẻ vuông góc với trục thanh trước khi biến dạng



(hình 1.11b) thì sau khi biến dạng không còn thẳng và vuông góc với trục thanh nữa (hình 1.12). Điều đó chứng tỏ các mặt cắt không cong phẳng mà đã bị vênh đi và góc vuông của các hình chữ nhật nhỏ kẻ trên mặt bên không còn vuông nữa (dấu hiệu của sự xuất hiện ứng suất  $\tau$ ). Như vậy, tại một điểm bất kỳ trên mặt cắt của dầm chịu uốn ngang vừa phát sinh ứng suất pháp vừa phát sinh ứng suất tiếp.



Hình 1. 12 Dầm chịu uốn thuần ngang phẳng

Tất cả các thành phần ứng suất pháp, ứng suất tiếp cũng như các thông số hình học của dầm chịu uốn trong nghiên cứu này đều dựa trên cơ sở của lý thuyết sức bền vật liệu.

### 1.3. Kết luận, mục tiêu và cách tiếp cận nghiên cứu

Trong chương này đã giới thiệu tổng quan về lĩnh vực nghiên cứu của đề tài gồm cơ sở lý thuyết của dầm chịu uốn và thiết bị sử dụng để xác định chuyển vị. Trên cơ sở này, mục tiêu của đề tài nghiên cứu sẽ tiến hành thiết kế và chế tạo thiết bị đo chuyển vị đơn giá có giá thành thấp để đo chuyển vị của chi tiết (dầm) chịu uốn nhằm mục đích phục vụ giảng dạy cho sinh viên ngành Công nghệ kỹ thuật Cơ khí, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật.

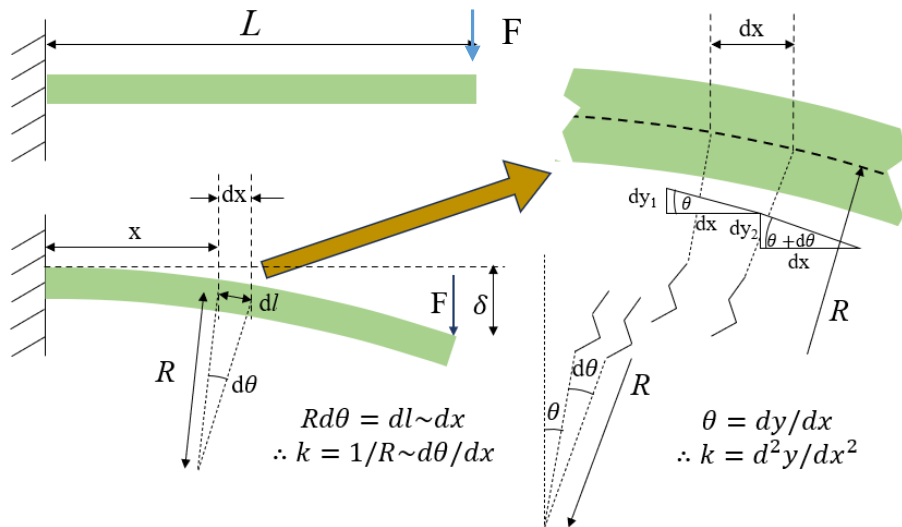
Cách tiếp cận nghiên cứu được sử dụng sẽ dựa trên cơ sở lý thuyết cơ học vật rắn biến dạng đã biết, tính toán thiết kế sử dụng phương pháp số (phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán mô hình hoá và mô phỏng) nhằm xác độ võng của chi tiết, sau đó tiến hành thiết kế và chế tạo mô hình thiết bị, cuối cùng là thử nghiệm để đánh giá kết quả.

## CHƯƠNG 2. TÍNH TOÁN LÝ THUYẾT DỰA TRÊN CÁC MÔ HÌNH 2 CHIỀU (2D)

Trong chương này, chúng tôi sẽ giới thiệu mô hình tính toán cho trường hợp dầm chịu uốn ngang phẳng, tiếp theo sẽ giới thiệu phương pháp phần tử hữu hạn 2 chiều (2D) để tính toán phân tích kết quả đạt được nhằm mục đích so sánh với kết quả mô phỏng số ở chương tiếp theo.

### 2.1. Xây dựng mô hình tính toán phân tích cho dầm chịu uốn

Mô hình tính toán cho dầm chịu uốn dựa trên cơ sở của lý thuyết sức bền vật liệu và bài toán cơ học vật rắn biến dạng mà chúng ta đã biết. Trong phần này, chúng tôi nhắc lại bài toán cơ học vật rắn biến dạng của dầm bị ngàm một đầu và chịu tải tập trung ở đầu còn lại và bài toán dầm được đặt trên 2 gối tựa chịu tải ở trung điểm như hình 2.1 và hình 2.2 bên dưới.



Hình 2. 1 Dầm chịu uốn ngang phẳng được ngàm 1 đầu và 1 đầu chịu tải tập trung

Mô hình mà chúng tôi sử dụng được tính toán dựa trên phương pháp tích phân hai lớp. Phương pháp này sử dụng phương trình momen độ cong, công thức toán học đạo hàm bậc 2 xác định độ cong kết hợp với các điều kiện biên để tính toán cho trường hợp dầm công xôn.

Phương trình momen độ cong, ta có:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{E.J} \quad (2.1)$$

Trong phương trình,  $\frac{1}{R}$  là công thức độ cong của dầm, ta tính theo đường trung hòa.

M là momen do ngoại lực, tích EJ đại diện cho độ chống uốn của dầm (E: là mô đun đàn hồi của vật liệu dầm và J là momen quán tính của tiết diện mặt cắt ngang của dầm).

Momen độ cong tại điểm bất kỳ:

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (2.2)$$

Trong nghiên cứu này, chúng tôi khảo sát biến dạng trong vùng đàn hồi và phần tử dầm biến dạng có độ dốc nhỏ nên:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0 \quad \text{và} \quad \frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

Vậy, kết hợp (2.1) và (2.2) ta có:

$$M = EJ \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.3)$$

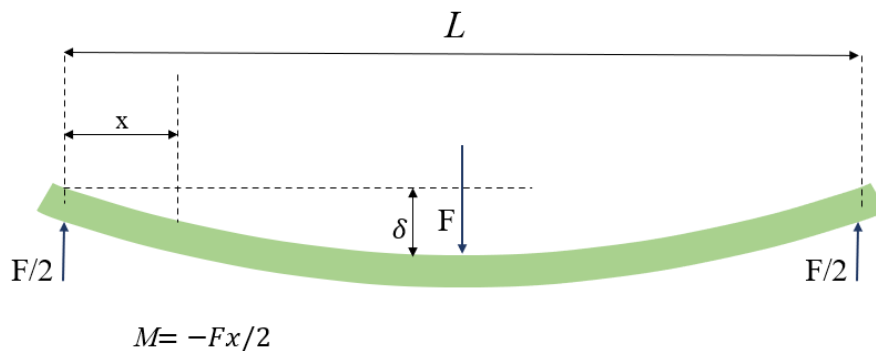
Theo lý thuyết sức bền vật liệu chúng ta đã biết được độ võng (chuyển vị) tổng quát được xác định như sau:

$$\delta = \frac{Fx^2}{6EI} (3L - x) \quad (2.4)$$

Chuyển vị lớn nhất tại  $x=L$ :

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2.5)$$

Phân tích tương tự cho bài toán dầm chịu uốn ngang phẳng qua 3 điểm như hình 2.2 bên dưới, cũng trên cơ sở của lý thuyết sức bền vật liệu chúng ta hoàn toàn xác định được độ võng (chuyển vị) của dầm tại các vị trí mà tải trọng tác dụng tương ứng với các mặt cắt ngang.



Hình 2. 2 Mô hình biến dạng của dầm chịu uốn 3 điểm

Trong trường hợp này ta có phương trình chuyển vị của dầm theo lý thuyết sức bền vật liệu là:

$$\delta = \frac{Fx}{48EI} (3L^2 - 4x^2) \quad (2.6)$$

Và chuyển vị lớn nhất tại trung điểm của dầm  $x = \frac{L}{2}$ :

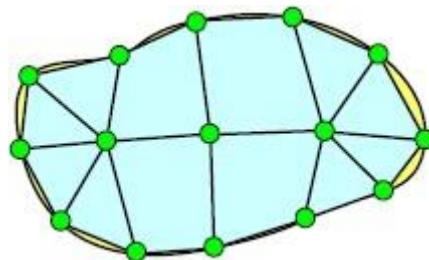
$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (2.7)$$

Trong đó: F là tải trọng (ngoại lực) tác dụng lên dầm; L là chiều dài của dầm; E là modun đàn hồi của vật liệu dầm và I là momen quán tính của tiết diện mặt cắt ngang của dầm.

## 2.2. Phương pháp phần tử hữu hạn trong tính toán phân tích dầm chịu uốn

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là phương pháp số rất mạnh thể giải được hầu hết các bài toán trong kỹ thuật như: phân tích cấu trúc (structural analysis), truyền nhiệt (heat transfer), cơ chất lỏng (fluid flow), truyền chất (mass transport), thế năng điện từ (electromagnetic potential).

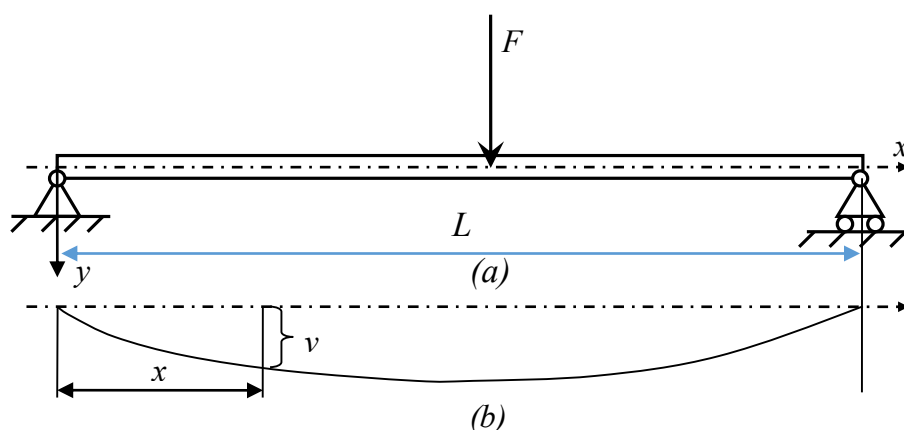
FEM tạo ra những giá trị xấp xỉ của những đại lượng cần tìm tại một số các điểm rời rạc trong miền tính toán. Do vậy, trong quá trình mô hình hóa, một miền tính toán được chia thành một hệ thống những miền nhỏ tương đương như hình 2.3. Những miền nhỏ tương đương này được liên kết với nhau tại những điểm chung của hai hay nhiều phần tử và/hoặc những đường biên và/hoặc những bề mặt. Quá trình chia nhỏ này được gọi là “rời rạc hóa” (discretization) và những miền nhỏ tương đương gọi là “phần tử” (element). Những điểm liên kết giữa các phần tử gọi là “điểm nút” (nodal points) hay “nút” (nodes).



Hình 2.3 Rời rạc miền tính toán

Trong FEM, thay vì tìm lời giải trên toàn miền tính toán, chúng ta sẽ xây dựng những phương trình cho mỗi phần tử và kết hợp những phương trình này lại để đạt được lời giải của toàn miền tính toán.

Dầm chịu uốn ngang phẳng rất phổ biến trong kỹ thuật, như giới thiệu ở hình 2.4 bên dưới:



Hình 2. 4 (a) Sơ đồ hoá dầm chịu uốn; (b) Biến dạng của trục dầm

Trong trường hợp biến dạng nhỏ chúng ta đã có kết quả như sau:

$$\sigma = -\frac{M}{J} y \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.9)$$

Phương trình độ võng:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M}{EJ} \quad (2.10)$$

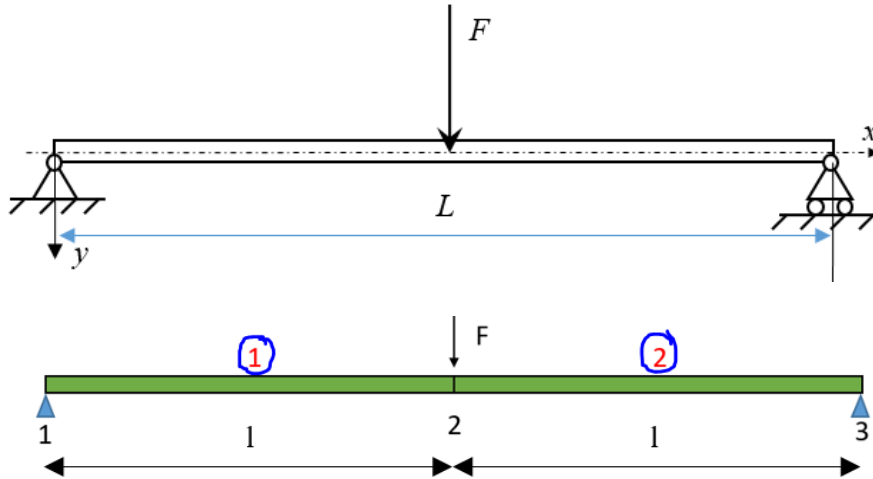
Trong đó:  $\sigma$  là ứng suất pháp,  $\varepsilon$  là biến dạng dài,  $M$  là mômen uốn nội lực trên mặt cắt ngang,  $v$  là độ võng của trục  $x$  và  $J$  là mômen quán tính của mặt cắt ngang đối với trục trung hoà.

### 2.3. Ứng dụng tính toán cho mô hình toán cụ thể

Phần này giới thiệu mô hình phần tử hữu hạn của bài toán dầm chịu uốn ở hình 2.3 chịu tải trọng tập trung tại trung điểm của dầm, đây là trường hợp đơn giản của bài toán

do có số phần tử và số nút rất ít. Mục đích để xác định chuyển vị lớn nhất của dầm nhằm so sánh và đánh giá kết quả với phương pháp giải tích theo công thức được tính toán theo lý thuyết sức bền vật liệu và mô phỏng số sử dụng phần mềm.

Chia dầm trên thành 2 phần tử mỗi phần tử có 2 nút và mỗi nút có 2 bậc tự do (tổng số nút của bài toán là 3 nút), chiều dài tổng cộng của dầm là  $L$ , các phần tử có kích thước bằng nhau  $l_1 = l_2 = L/2$ .



Hình 2. 5 Tính dầm chịu uốn bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Chúng ta biết được rằng ma trận độ cứng của 1 phần tử dầm chịu uốn  $k_e$  được xác định như sau:

$$k_e = \frac{EJ}{l_e^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l_e & -12 & 6l_e \\ 6l_e & 4l_e^2 & -6l_e & 2l_e^2 \\ -12 & -6l_e & 12 & -6l_e \\ 6l_e & 2l_e^2 & -6l_e & 4l_e^2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Áp dụng cho mô hình bài toán trên chúng ta có được ma trận độ cứng của 2 phần tử và ma trận độ cứng toàn cục  $[K]$  bên dưới:

$$[k_1] = [k_2] = \frac{EJ}{(l)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[K] = [k_1] + [k_2] = \frac{EJ}{(l)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l & 0 & 0 \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 & 0 & 0 \\ -12 & -6l & 24 & 0 & -12 & 6l \\ 6l & 2l^2 & 0 & 8l^2 & -6l & 2l^2 \\ 0 & 0 & -12 & -6l & 12 & -6l \\ 0 & 0 & 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Áp dụng cho một số trường hợp cụ thể đối với dầm chịu uốn ở hình 2.4, với vật liệu sử dụng là hợp kim nhôm, chiều dài  $L = 200\text{mm}$ , modun đàn hồi  $E = 68,9\text{E}3 \text{ MPa}$ ; chia dầm thành 2 phần tử mỗi phần tử 2 nút như trên thì chiều dài của một phần tử  $l=100\text{mm}$ , đường kính mặt cắt ngang và tải trọng tác dụng thay đổi khác nhau. Kết quả thu được như trong bảng 2.1 bên dưới.

*Bảng 2. 1 Kết quả tính toán cho một số trường hợp*

STT	Đường kính của dầm (mm)	Tải trọng (N)	Kết quả đạt được (mm)
1	6	50	1.9012
2	6	70	2.6617
3	6	90	3.4222
4	6	110	4.1826
5	8	50	0.6016
6	8	70	0.8422
7	8	90	1.0828
8	8	110	1.3234
9	10	50	0.2464
10	10	70	0.3450
11	10	90	0.4435
12	10	110	0.5421

#### **2.4 . Kết quả, phân tích và kết luận**

Từ kết quả tính toán đơn giản cho một số trường hợp của dầm 2 phần tử mỗi phần tử 2 nút chịu uốn với kích thước và tải trọng khác, kết quả đạt được đảm bảo độ chính xác và phù hợp với từng trường hợp khi tăng tải trọng lên dầm chịu uốn.

Đây là tiền đề để thực hiện việc so sánh và đánh giá với kết quả mô phỏng số và thực nghiệm trong các chương tiếp theo.

## **CHƯƠNG 3. MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG SỐ SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN**

Trong chương này sẽ tiến hành xây dựng mô hình 3 chiều (3D) cho thiết bị dầm chịu uốn để làm cơ sở cho việc chế tạo thiết bị được trình bày trong chương 4. Sau khi xây dựng mô hình 3D, chúng tôi sẽ tiến hành các mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn dưới sự trợ giúp của máy tính. Kết quả tính toán sẽ được đánh giá, so sánh với kết quả tính toán ở chương 2.

### **3.1. Xây dựng mô hình 3 chiều cho thiết bị đo chuyển vị của dầm chịu uốn**

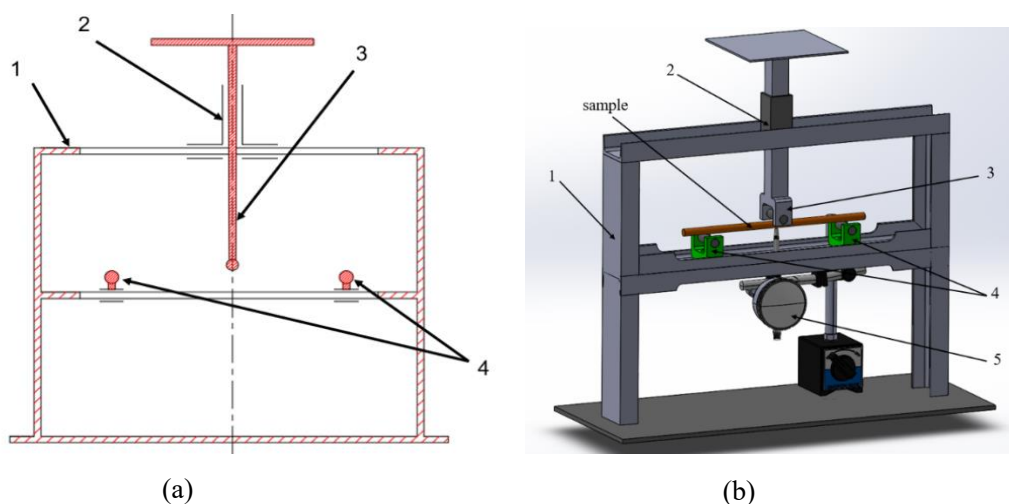
#### **3.1.1. Giới thiệu sơ lược về mô hình thiết bị được chế tạo**

Với mục đích kiểm tra chính xác và thuận tiện khả năng uốn của dầm có chiều dài 350mm, một thiết bị kiểm tra uốn 3 điểm tùy chỉnh đã được thiết kế và chế tạo. Thiết bị ưu tiên ba yêu cầu chính:

- Tính linh hoạt: Có khả năng chứa dầm có chiều dài tối đa 350 mm.
- Độ chính xác: Cung cấp các phép đo chuyển vị (độ võng) chính xác và đáng tin cậy.
- Dễ sử dụng: Hoạt động đơn giản và trực quan để kiểm tra hiệu quả.

Các thành phần của thiết bị như hình 3.1 bao gồm khung đỡ (1) U50 làm bằng thép C45 chắc chắn để ổn định và giảm thiểu độ lệch, ray trượt (2) dẫn hướng chuyển động thẳng đứng của khối đặt tải để đảm bảo lực tác dụng được kiểm soát, khối đặt tải hình trụ (3) có đường kính  $d = 8$  mm để truyền tải trọng tác dụng tới dầm chịu uốn và hai gối đỡ hình trụ (4) có thể điều chỉnh có đường kính  $d = 10$  mm, cho phép tùy chỉnh khoảng cách để phù hợp với các trường hợp thí nghiệm đối với các mẫu thử có kích thước khác nhau. Thiết bị kiểm tra (5) là đồng hồ sơ được gắn bên dưới dầm để xác định giá trị chuyển vị lớn nhất tại điểm chịu tác dụng của tải trọng.





Hình 3. 1 (a) Sơ đồ thiết bị kiểm tra và (b) Mô hình CAD 3D

1: Khung đỡ - 2: Ray trượt - 3: Khối đặt tải - 4: Hai gối đỡ - 5: Dụng cụ đo độ võng

Sau quá trình tính toán, tiến hành thiết kế các chi tiết theo từng cụm như theo phương án thiết kế. Thiết bị có cấu tạo gồm 4 bộ phận chính:

1: Khung đỡ

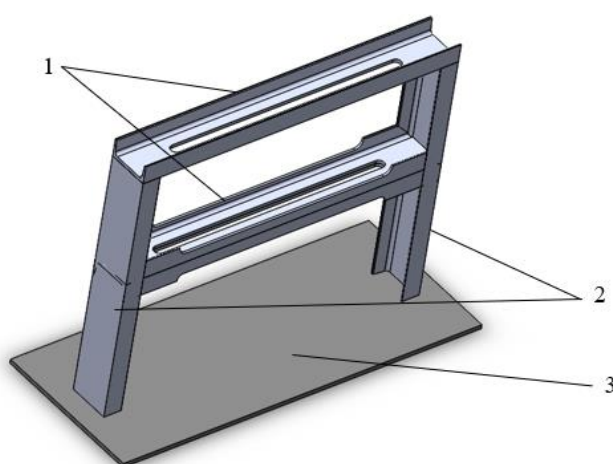
2: Ray trượt

3: Khối đặt tải

4: Hai gối đỡ

Các chi tiết sẽ được lắp ráp thành các cụm và các cụm sẽ lắp ráp với nhau thành máy hoàn chỉnh.

### 3.1.1. Thiết kế khung đỡ



Hình 3. 2 Mô hình CAD 3D khung đỡ

1: Hai thanh chịu tải - 2: Hai trụ đỡ - 3: Tấm đế

**Cấu tạo:** bộ phận khung đỡ được tạo thành từ 3 chi tiết chính:

1: Hai thanh chịu tải

2: Hai trụ đỡ

3: Tấm đế

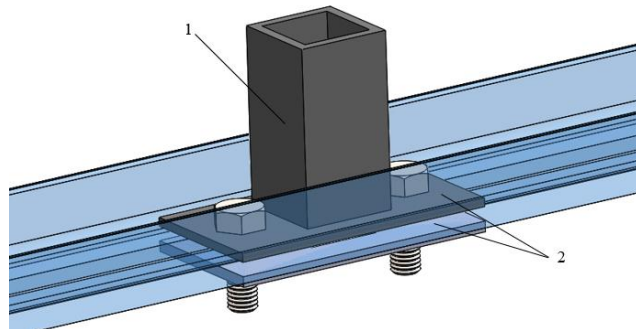
Hai thanh chịu tải có chiều dài 400mm, có chức năng cố định ray và gối đỡ. Hai trụ đỡ có chiều dài 300mm, có chức năng chống đỡ toàn bộ kết cấu. Tấm đế có kích thước 185×450 (mm), có chức năng ổn định thăng bằng cho toàn bộ kết cấu khung đỡ.

**Khung đỡ hình chữ nhật có những ưu điểm sau:**

- Tối ưu hóa không gian: Hình dạng chữ nhật giúp tối ưu hóa không gian sử dụng, đặc biệt là trong các công trình xây dựng có diện tích hạn chế.
- Dễ dàng thi công: Các cạnh và góc vuông giúp việc thiết kế và thi công trở nên dễ dàng hơn, đồng thời giảm thiểu sai số trong quá trình lắp đặt.
- Chịu lực tốt: Khung chữ nhật có khả năng chịu lực tốt, phân bổ đều tải trọng lên nền móng, giúp cấu trúc công trình vững chắc.
- Linh hoạt trong thiết kế: Phù hợp với nhiều phong cách kiến trúc khác nhau, từ cổ điển đến hiện đại.
- Hiệu quả chi phí: Việc sản xuất và thi công khung đỡ hình chữ nhật thường có chi phí thấp hơn so với các hình dạng phức tạp khác.

**Công dụng:** khung đỡ U50 bằng thép C45 chắc chắn để ổn định và giảm thiểu độ lệch khi chịu tải. Chống đỡ kết cấu và tất cả các bộ phận của thiết bị đo chuyên vị của dầm chịu uốn.

**3.1.2. Thiết kế ray trượt**



Hình 3. 3 Mô hình CAD 3D của ray trượt

1: Ray trượt vuông - 2: Hai tấm ray trượt

**Cấu tạo:** bộ phận ray được tạo thành từ 2 chi tiết chính:

*1: Ray trượt vuông*

*2: Hai tấm ray tùy động*

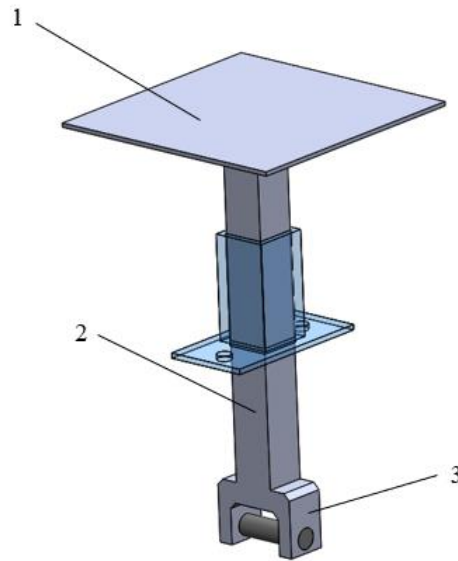
Ray trượt vuông có chiều dài 50mm có chức năng định hướng thẳng trên xuống cho khối tải đảm bảo hướng tác dụng lực chính xác. Hai tấm ray tùy động có kích thước 40×75 (mm), được cố định vào khung đỡ có chức năng làm ray trượt cho khối đặt tải đảm bảo vị trí lực tác dụng xuống dầm và có thể điều chỉnh vị trí để phù hợp với yêu cầu khi thí nghiệm.

**Ray trượt vuông có rất nhiều ưu điểm vượt trội như:**

- Thanh ray có độ cứng cáp và vững chắc cao.
- Ray trượt có thể chịu được trọng tải lớn.
- Thanh ray và các bộ phận chi tiết dễ lắp đặt và sai số khi lắp đặt thấp.
- Có khả năng định hướng, năng suất làm việc tối đa trong một thời gian lâu dài nhưng không xảy ra hiện tượng phát sinh về nhiệt.
- Tính ma sát trên thanh trượt được thiết kế để giảm tối đa, khi con trượt di chuyển trên ray.
- Độ chính xác của con ray dẫn hướng cao, giúp cho các chi tiết gia công giảm bớt sai số.
- Hỗ trợ tốt cho việc cân bằng lực giữa các thiết bị máy móc của động cơ gắn trên ray.
- Quá trình hoạt động chuyển động êm ái, mượt mà.
- Quy trình tháo dỡ và lắp đặt cũng dễ dàng, không gây mất nhiều thời gian cho quá trình này.
- Ngoài ra thời gian sử dụng sản phẩm cũng tương đối lâu dài.

**Công dụng:** Ray trượt dẫn hướng chuyển động thẳng đứng của khối đặt tải để đảm bảo lực tác dụng được kiểm soát và vị trí tác dụng lực theo yêu cầu của thí nghiệm.

### 3.1.3. Thiết kế khối đặt tải



Hình 3. 4 Mô hình CAD 3D khối đặt tải

1: Tấm đặt tải - 2: Thanh trượt – 3: gối đặt lực

**Cấu tạo:** bộ phận khung đỡ được tạo thành từ 3 chi tiết chính:

- 1: Tấm đặt tải
- 2: Thanh trượt
- 3: gối đặt lực

Tấm đặt tải có kích thước  $120 \times 120$  (mm), có chức năng đỡ các khối tải có trọng lượng phù hợp. Thanh trượt có chiều dài 170mm có chức năng định hướng thẳng trên xuống cho khối tải đảm bảo hướng tác dụng lực chính xác. Gối đặt lực được cấu tạo từ khối thép chữ U và một trụ đặt lực ( $d = 8$  mm), có chức năng để truyền tải trọng uốn tới dầm theo phương chuyển động thẳng đứng để xác định chính xác vị trí chuyển vị.

**Ưu điểm của việc đặt tải trọng trực tiếp khi kiểm tra dầm chịu uốn bao gồm:**

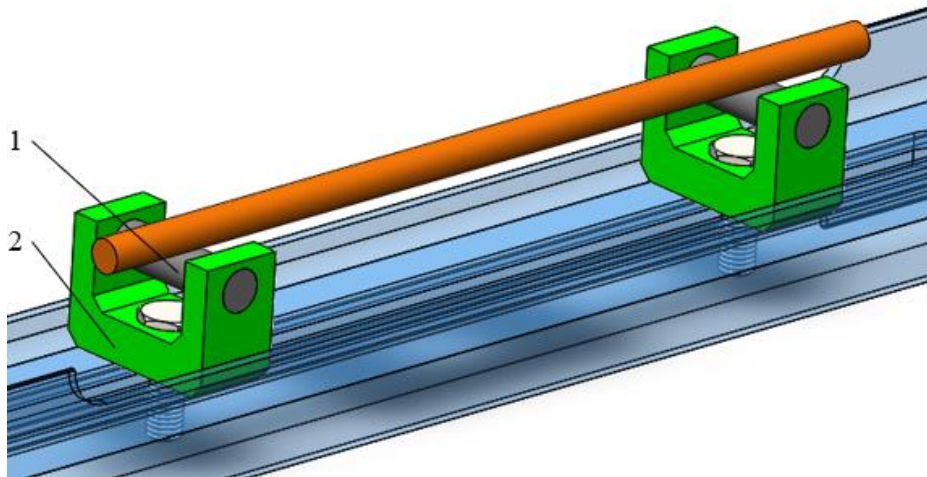
- Tính chính xác cao: Việc đặt tải trọng trực tiếp lên dầm giúp phản ánh một cách chính xác hơn các điều kiện thực tế mà dầm sẽ phải chịu đựng trong quá trình sử dụng.
- Dễ dàng quan sát: Khi tải trọng được đặt trực tiếp, việc quan sát và đo lường các biến dạng, khe nứt hoặc các vấn đề khác trở nên dễ dàng hơn.
- Phản ứng thực tế: Tải trọng trực tiếp giúp mô phỏng các phản ứng của dầm dưới tác động của lực, từ đó có thể đánh giá được khả năng chịu lực và độ bền của

dầm một cách thực tế.

- Kiểm tra toàn diện: Có thể kiểm tra được cả ứng suất và độ võng của dầm, cung cấp một bức tranh toàn diện về hiệu suất của dầm khi chịu tải.
- Thích ứng với các loại dầm: Phương pháp này có thể áp dụng cho nhiều loại dầm khác nhau, từ dầm bê tông cốt thép đến dầm thép và các vật liệu khác.

**Công dụng:** Khối đặt tải dùng để đặt tải trọng cần thiết để truyền tải trọng uốn tới dầm theo phương chuyển động thẳng đứng để xác định chính xác vị trí chuyển vị khi kiểm tra độ võng của dầm.

#### 3.1.4. Thiết kế gối đỡ



Hình 3. 5 Mô hình CAD 3D hai gối đỡ

1: Gối đỡ hình trụ - 2: Khối thép chữ U

**Cấu tạo:** bộ phận khung đỡ được tạo thành từ 2 chi tiết chính là: Gối đỡ hình trụ và khối thép chữ U

Gối đỡ hình trụ có chiều dài 42mm đường kính  $d = 10\text{mm}$  có chức năng làm gối đỡ trực tiếp cho mẫu thử. Khối thép chữ U có chiều dài 20mm kích thước  $36 \times 42 \times 8$  được lắp trên khung đỡ có chức năng cố định gối đỡ hình trụ.

**Ưu điểm của gối đỡ tùy động bao gồm:**

- Khả năng làm việc ổn định: Gối đỡ có thể vận hành với tốc độ lớn mà vẫn đảm bảo sự ổn định.
- Chịu tải và va đập tốt: Chất liệu hợp kim gang giúp gối đỡ chịu được trọng tải lớn và va đập.

- Thiết kế nhỏ gọn: Gói đỡ có kích thước nhỏ, dễ dàng lắp ráp và sử dụng.
- Chuyển động êm ái và mượt mà: Cung cấp chuyển động nhẹ nhàng, giảm ma sát và tiếng ồn khi máy móc hoạt động.
- Dễ dàng bảo dưỡng và thay thế: Do phổ biến và giá cả phải chăng, gói đỡ dễ dàng được bảo dưỡng và thay thế khi cần.
- Tăng hiệu suất làm việc: Thiết kế gói đỡ giúp dễ dàng bôi trơn, từ đó tăng hiệu suất làm việc và tuổi thọ của máy.

**Công dụng:** Hai gói đỡ hình trụ có thể điều chỉnh ( $d = 10 \text{ mm}$ ) làm gói đỡ cho mẫu thử phục vụ cho quá trình thí nghiệm dầm chịu uốn, cho phép tùy chỉnh khoảng cách để phù hợp với các trường hợp thí nghiệm khác nhau.

### 3.1.5. Dụng cụ đo độ võng

Sử dụng đồng hồ so (Mitutoyo 2050s-11) kết hợp với giá đỡ để từ để đo độ võng của dầm.



Hình 3. 6 Bộ đồng hồ so để đo chuyển vị trong thí nghiệm

**Đồng hồ so có nhiều ưu điểm khi sử dụng, đặc biệt trong ngành công nghiệp và cơ khí:**

- Độ chính xác cao: Đồng hồ so có khả năng đo với sai số rất thấp, độ chia nhỏ từ 0.01 mm đến 0.001 mm.
- Đa dạng phạm vi đo: Có thể thay đổi độ chia và phạm vi đo, từ mm sang inch

cho phù hợp với yêu cầu đo kiểm.

- Chức năng lưu trữ kết quả đo: Giúp theo dõi và so sánh các kết quả đo lường trước đó.
- Đầu ra dữ liệu: Có khả năng xuất dữ liệu đo để xử lý và phân tích sau này.
- Dễ dàng đọc kết quả đo: Màn hình hiển thị rõ ràng, giúp tránh nhầm lẫn và đọc kết quả một cách dễ dàng.
- Đa năng và linh hoạt: Phù hợp với nhiều loại đo lường khác nhau, từ đo độ thẳng, độ phẳng, đến đo độ không song song của rãnh.

Những tính năng này làm cho đồng hồ so trở thành công cụ không thể thiếu trong quá trình sản xuất và kiểm tra chất lượng sản phẩm trong ngành cơ khí.

### **3.2. Mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn**

#### **3.2.1. Mô phỏng số bài toán dầm chịu uốn 2D sử dụng phần mềm ABAQUS®**

ABAQUS® [18] là một phần mềm chuyên dùng để thiết kế, tính toán và mô phỏng công trình, kết cấu dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn, phạm vi giải quyết vấn đề của nó từ phân tích tuyến tính tương đối đơn giản đến các vấn đề mô phỏng phi tuyến phức tạp. Đồng thời hiện nay ABAQUS® được hãng Dassault Systèmes phát triển lên thành 3DEXPERIENCE, với nhiều tính năng mới như có các mô hình vật liệu có thể mô phỏng đại đa số tính năng vật liệu kết cấu điển hình, trong đó bao gồm kim loại, cao su, vật liệu cao phân tử, vật liệu phức hợp, bê tông cốt thép.... ABAQUS® không chỉ giải quyết vấn đề trong phân tích kết cấu (ứng suất, chuyển vị, biến dạng)... mà còn có khả năng mô phỏng và nghiên cứu vấn đề trong lĩnh vực khác như truyền dẫn nhiệt, phân tích âm thanh, điện tử - điện từ trường, phân tích cơ học môi trường điện áp...

#### **Các bước mô phỏng trên Abaqus® CAE**

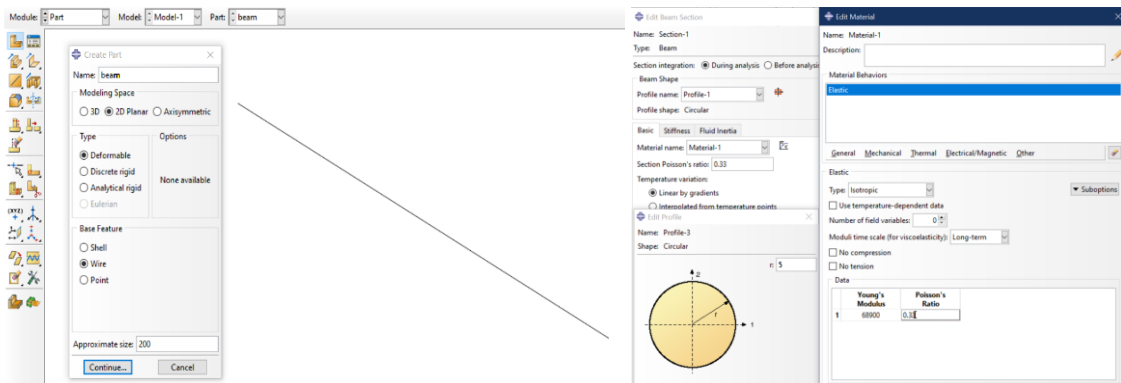
- Bước 1: Part – tạo mô hình tính toán
- Bước 2: Property – đặt thuộc tính vật liệu
- Bước 3: Assembly – Lắp ráp
- Bước 4: Step - Đặt bước tính toán

- Bước 5: Load – Điều kiện biên
- Bước 6: Mesh – Chia lưới cho phần tử
- Bước 7: Job - Tiến hành chạy mô phỏng số

### 1. Part - Tạo mô hình dầm chịu uốn trong môi trường ABAQUS® 2 chiều (2D)

Thực hiện các bước thiết lập bài toán trong phần mềm ABAQUS®, bước đầu tiên của một bài toán bao giờ cũng là phải tạo một mô hình, mô hình được tạo ra như hình 3.7 bên dưới.

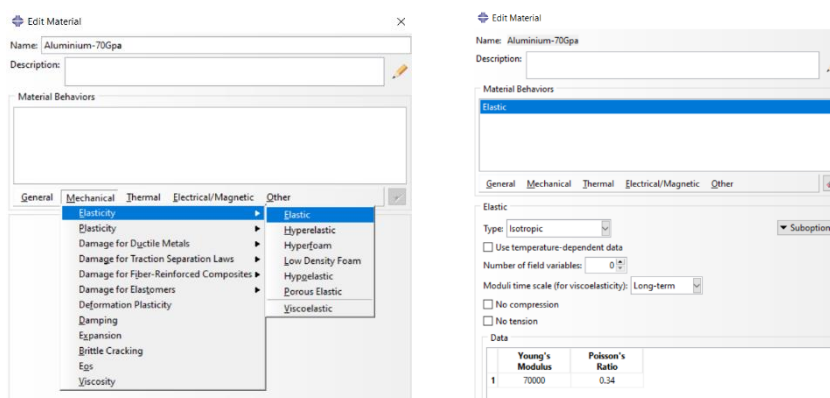
Khởi động phần mềm Abaqus®, để tiến hành thiết kế mô hình dầm đơn với kích thước đường kính, chiều dài xác định.



Hình 3. 7 Tạo mô hình dầm chịu uốn 2D trong phần mềm Abaqus®

### 2. Property – Gán vật liệu cho dầm

Để gán vật liệu cho dầm, vào phần material trong cây model, trong hộp thoại edit material ta đặt tên cho vật liệu, trường hợp này là thép, rồi chọn các mục như hình 3.8 (vật liệu đàn hồi):



Hình 3. 8 Đặt thuộc tính vật liệu cho dầm

Sau đó ta điền thông số modun đàn hồi và hệ số poisson của vật liệu. Trong nghiên



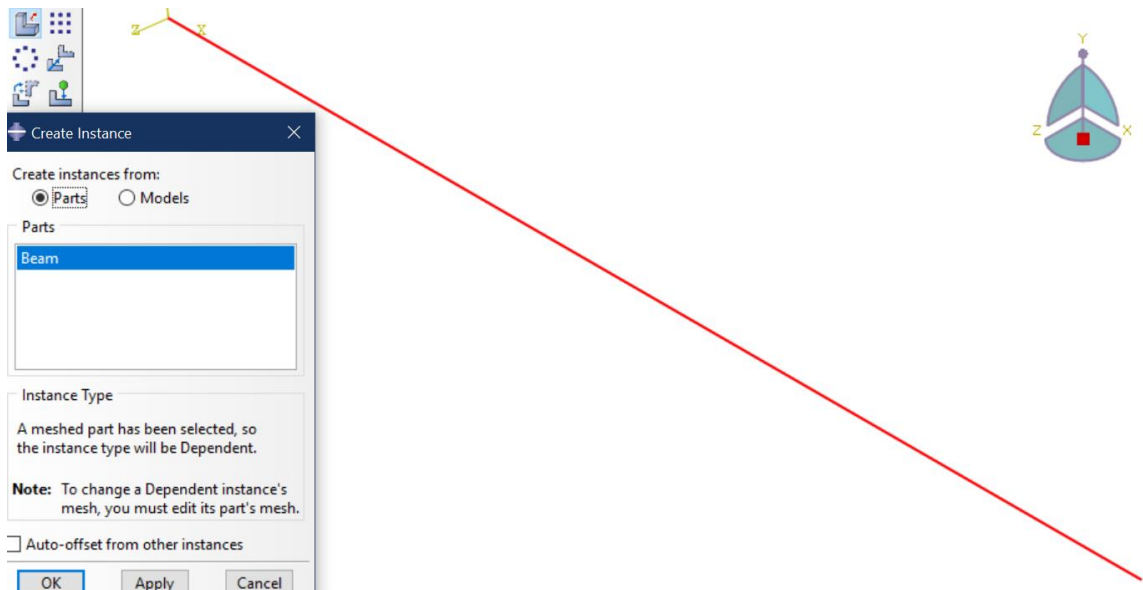
cứu này vật liệu đẳng hướng, đồng nhất và làm việc trong giới hạn đàn hồi.

### 3. Assembly – Lắp ghép

Mô hình lắp ráp cho bài toán dầm chịu uốn 3 điểm rất đơn giản như sau:

- Trước hết là tạo Instance của một part – gối đỡ:

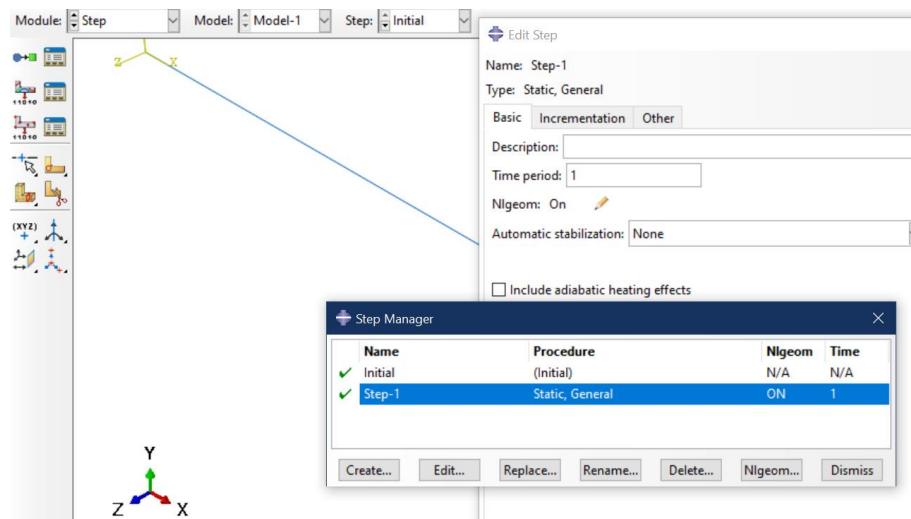
Mở rộng mục Assembly trong model tree, double-click vào instances như trong hình vẽ để tạo instances:



Hình 3. 9 Tạo lắp ráp cho dầm chịu uốn 2D

### 4. Step – Thiết lập bước tính toán

Trong nghiên cứu này bài toán dầm chịu uốn được thiết lập tính toán đơn giản trong môi trường Static-general.



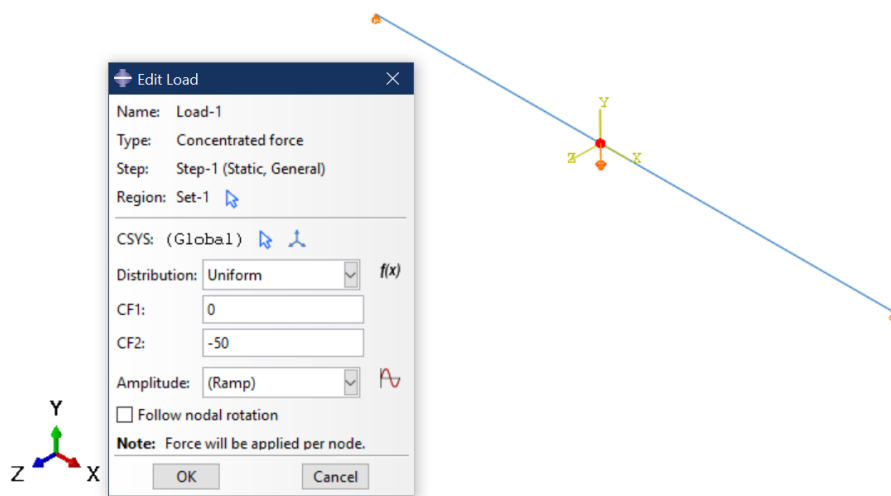
Hình 3. 10 Tạo bước cho tính toán dầm chịu uốn 2D

## 5. Load - Thiết lập điều kiện biên và đặt tải tác dụng lên dầm

Mô hình mô phỏng CAE cho dầm uốn 3 điểm được tính toán bằng lý thuyết phương pháp phần tử hữu hạn. Phần mềm Abaqus® được sử dụng trong nghiên cứu này để tính toán cho mô hình 2D.

### - Đặt tải tác dụng:

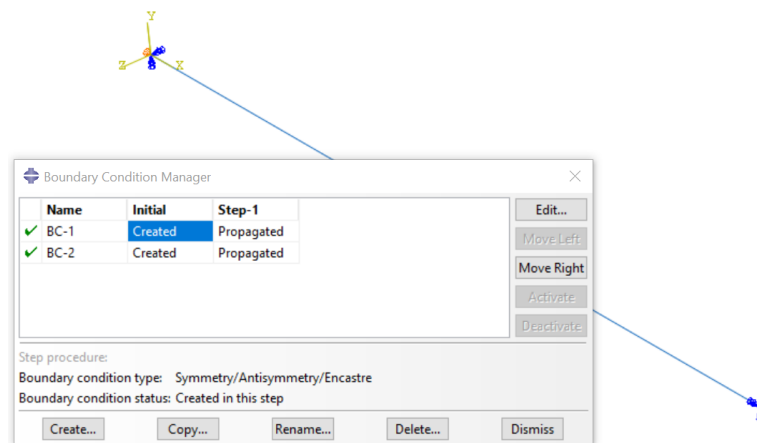
Một lực tập trung  $F(N)$  tác dụng vào điểm giữa của dầm. Trong nghiên cứu này chúng tôi thực hiện quá trình mô phỏng số cho 4 trường hợp tải trọng thay đổi khác nhau tương ứng với 3 thông số đường kính tiết diện mặt các ngang của dầm.



Hình 3. 11 Xác định vị trí tải trọng tập trung đối với dầm chịu uốn 2D

### - Thiết lập điều kiện biên:

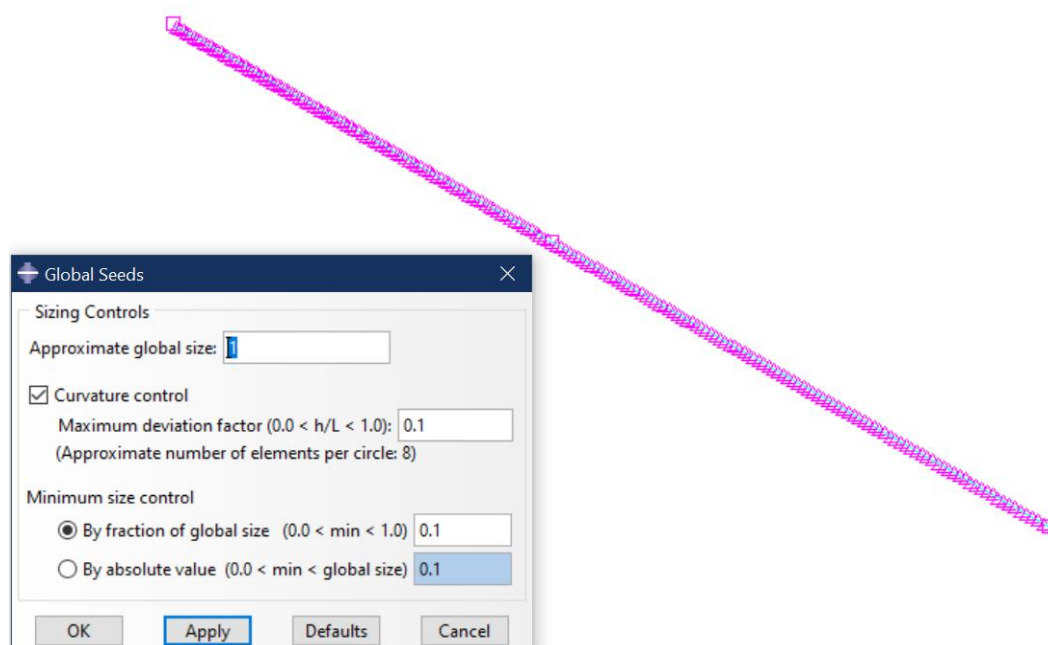
Tại hai gối đỡ, theo lý thuyết biến dạng dầm chịu uốn trong điều kiện lý tưởng. Tại hai nút ở 2 đầu mút của dầm chỉ xoay quanh trục z và di chuyển dọc theo trục x như hình 3.12.



Hình 3. 12 Thiết lập điều kiện biên đối với dầm 2D

## 6. Mesh – Chia lưới phần tử

Trong mô hình tính toán mô phỏng số 2 D, chúng tôi thực hiện việc chia lưới đơn giản cho các trường hợp khác nhau, để so sánh với kết quả tính toán ở chương 2 đầu tiên chia lưới trong mô phỏng số dưới sự trợ giúp của phần mềm Abaqus® được thực hiện như trong lý thuyết tính toán ở trên. Dầm được chia ra thành 2 phần tử, mỗi phần tử 2 nút và tổng số nút của mô hình trong trường hợp này là 3 nút. Tiếp theo chúng tôi thực hiện thay đổi thông số lưới như tăng thêm số phần tử để giảm kích thước phần tử hoặc chia theo kích thước lưới là 1mm như hình 3.13. Tuy nhiên kết quả mô phỏng số trong bài toán 2D thay đổi không đáng kể.

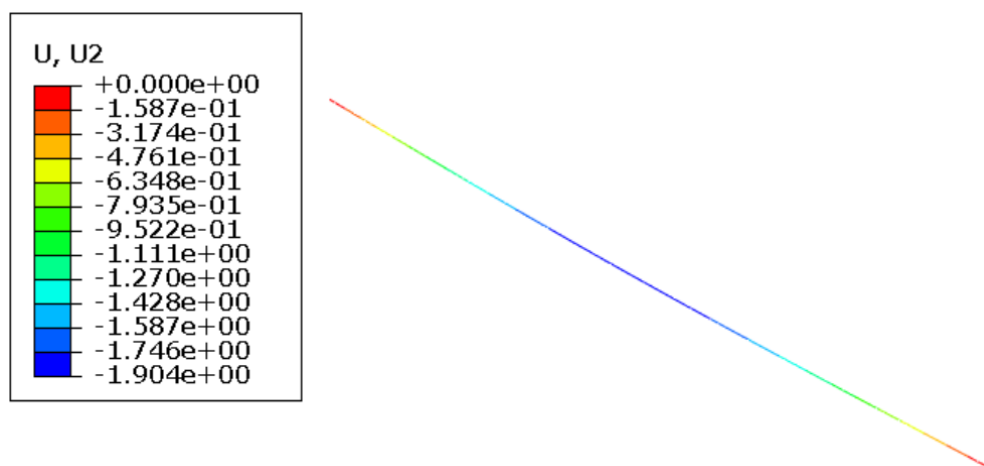


Hình 3. 13 Mô hình chia lưới với phần tử kích thước 1mm đối với dầm 2D

## 7. Kết quả mô phỏng số

Như đã nêu ở trên, việc thực hiện mô phỏng số được tiến hành với 3 trường hợp khác nhau về đường kính của dầm nhôm có mặt cắt ngang hình tròn theo đó đường kính lần lượt là 6 mm, 8 mm và 10 mm. Tất cả các mẫu được sử dụng để tính toán mô phỏng đều có chiều dài tiết diện uốn  $L = 200$  mm và chịu bốn giá trị tải trọng khác nhau lần lượt là: 50N, 70N, 90N và 110N.

Dưới đây là 1 trường hợp điển hình về kết quả mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm Abaqus® để xác định chuyển vị (độ võng) theo phương thẳng đứng.



Hình 3. 14 Độ võng lớn nhất  $U_2$  đối với dầm  $d=6\text{mm}$  chịu tải  $50\text{N}$  trong FEM 2D

Sau khi tiến hành mô phỏng số cho tất cả 12 trường hợp với các thông số và điều kiện nêu trên chúng tôi đã thu được các kết quả về chuyển vị lớn nhất đối với dầm khi tải đặt tại trung điểm của dầm và kết quả mô phỏng số được tổng hợp trong bảng dưới đây:

Bảng 3. 1 Kết quả chuyển vị của dầm sử dụng FEM mô hình 2D

Đường kính (mm)	Tải (N)	Kết quả chuyển vị lớn nhất của dầm (mm)
d = 6	50	1,904
	70	2,665
	90	3,425
	110	4,184
d = 8	50	0,6037
	70	0,8451
	90	1,087
	110	1,328
d = 10	50	0,2478

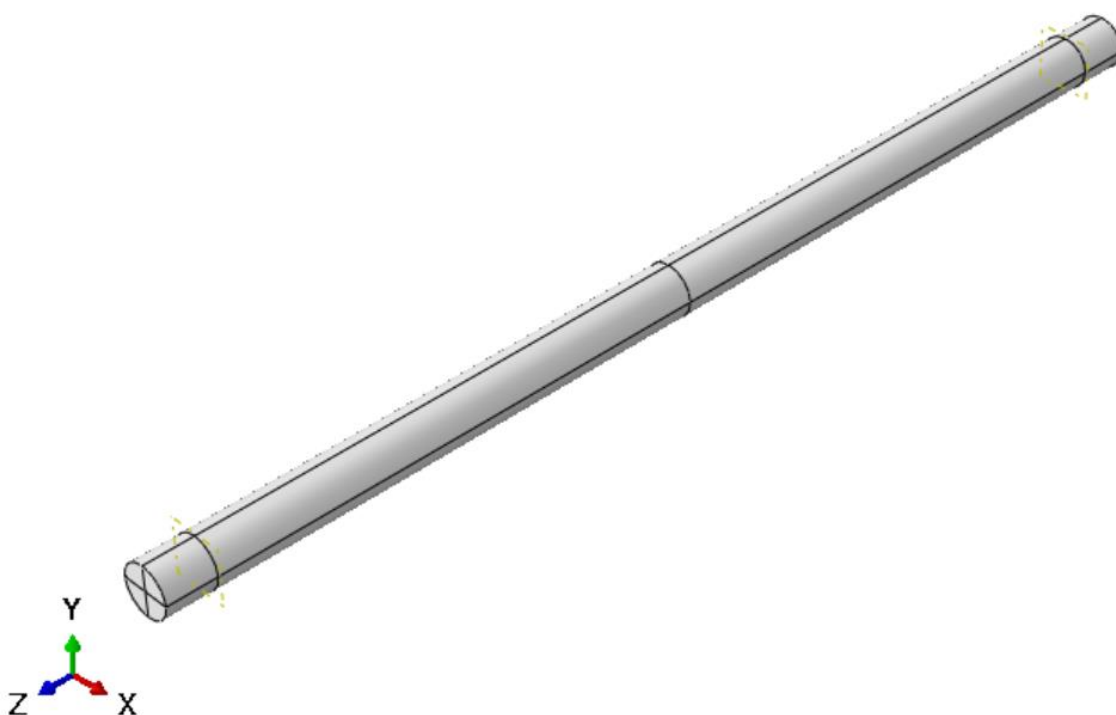
	70	0,3469
	90	0,446
	110	0,5451

### 3.2.2. Mô phỏng số bài toán dầm chịu uốn 3D sử dụng phần mềm ABAQUS®

Thực hiện tương tự như mô hình mô phỏng số phần tử hữu hạn 2D ở mục trên. Kết quả thiết lập trong môi trường 3D qua các bước được tổng hợp như bên dưới:

#### 1. Part - Tạo mô hình dầm chịu uốn trong môi trường ABAQUS® 3 chiều (3D)

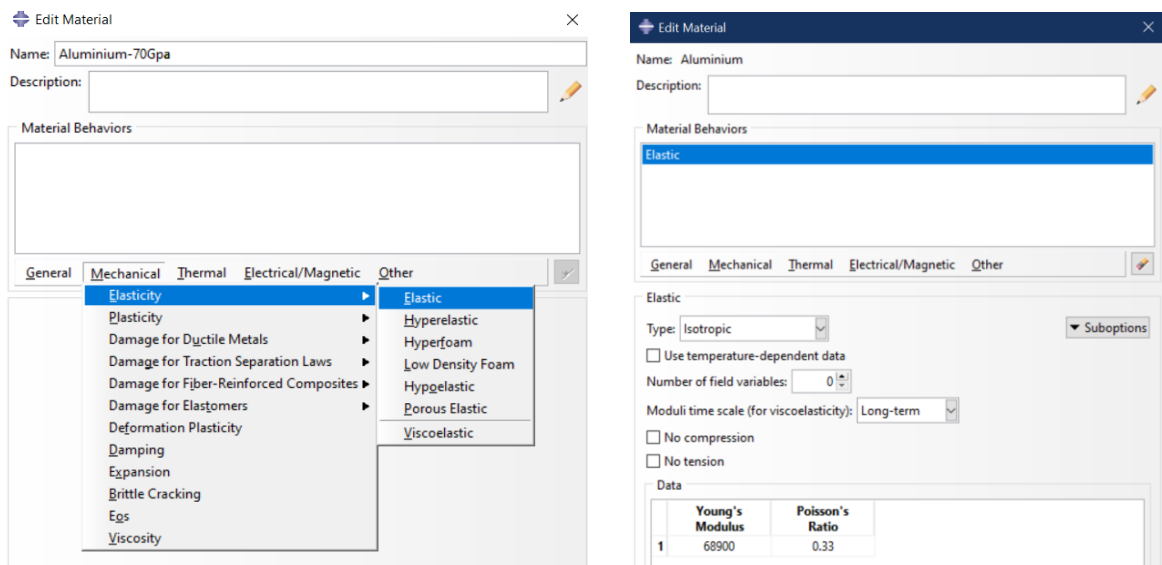
Khởi động phần mềm Abaqus®, để tiến hành thiết kế mô hình dầm đơn với kích thước đường kính, chiều dài xác định.



Hình 3. 15 Tạo mô hình dầm chịu uốn 3D trong phần mềm Abaqus®

#### 2. Property – Gán vật liệu cho dầm

Để gán vật liệu cho dầm, vào phần material trong cây model, trong hộp thoại edit material ta đặt tên cho vật liệu, trường hợp này là thép, rồi chọn các mục như hình 3.15 (vật liệu đàn hồi):

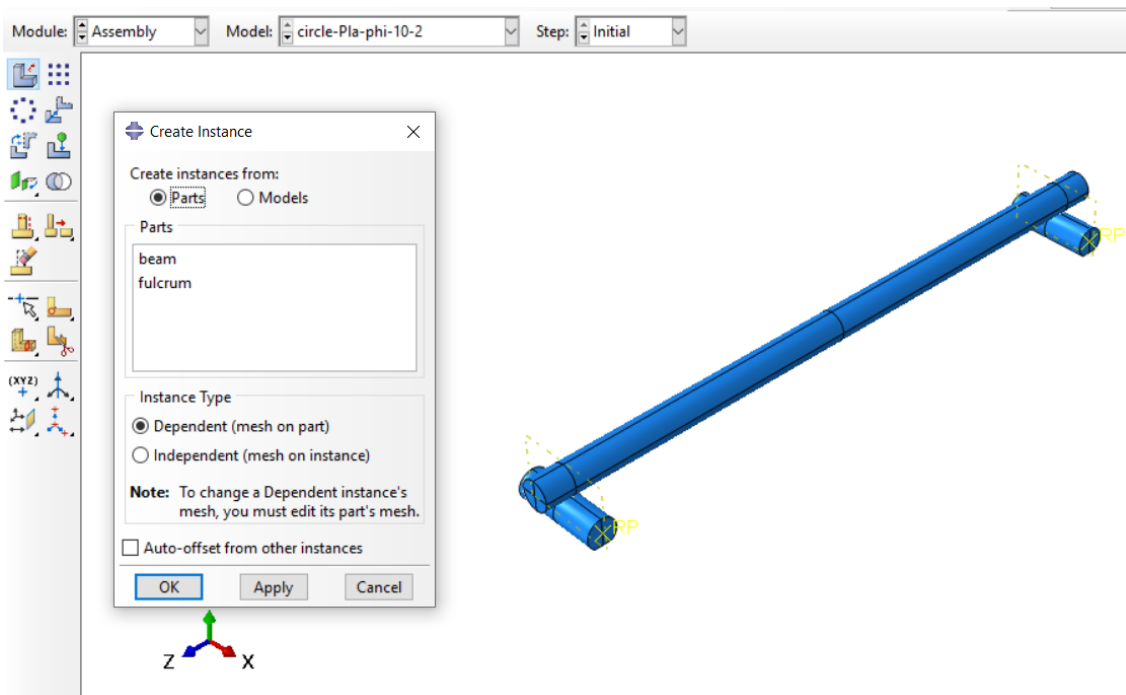


Hình 3. 16 Đặt thuộc tính vật liệu cho dầm

### 3. Assembly – Lắp ghép

Trước hết là tạo Instance của một part – gỏi đỡ:

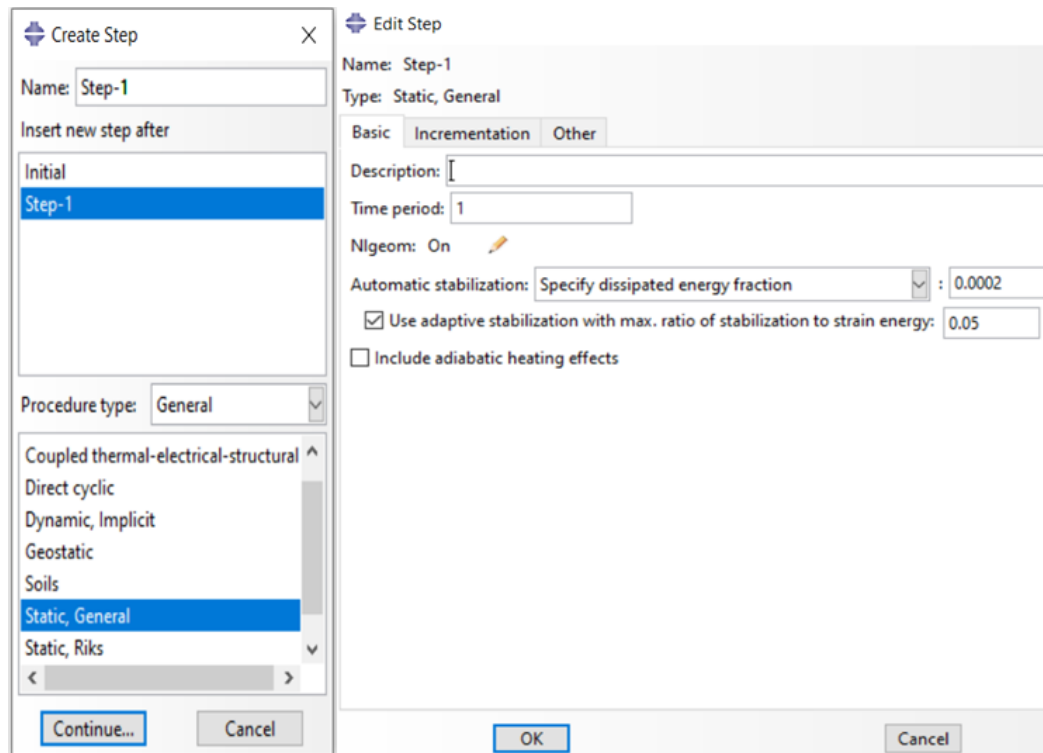
Mở rộng mục Assembly trong model tree, double-click vào instances như trong hình vẽ để tạo instances:



Hình 3. 17 Tạo lắp gỏi đỡ cho dầm 3D

### 4. Step – Thiết lập tính toán.

Tương tự như trong mô hình tính toán 2D dầm chịu uốn được thiết lập tính toán đơn giản trong môi trường Static-general.

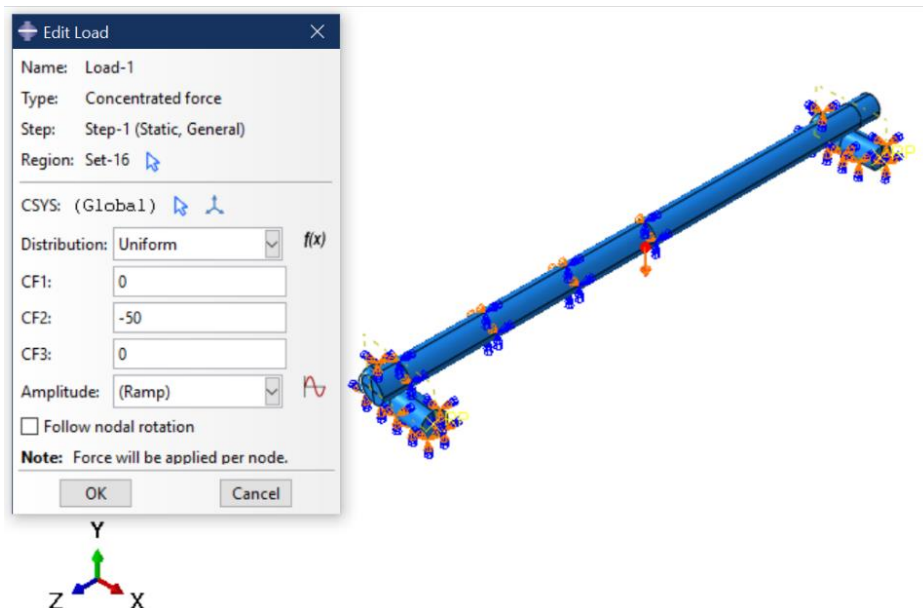


Hình 3. 18 Thiết lập môi trường tính toán cho dầm chịu uốn 3D

## 5. Load - Thiết lập điều kiện biên và đặt tải tác dụng lên dầm

Mô hình mô phỏng CAE cho dầm uốn 3 điểm được tính toán bằng lý thuyết phương pháp phần tử hữu hạn. Phần mềm Abaqus® được sử dụng trong nghiên cứu này để tính toán cho mô hình 3D.

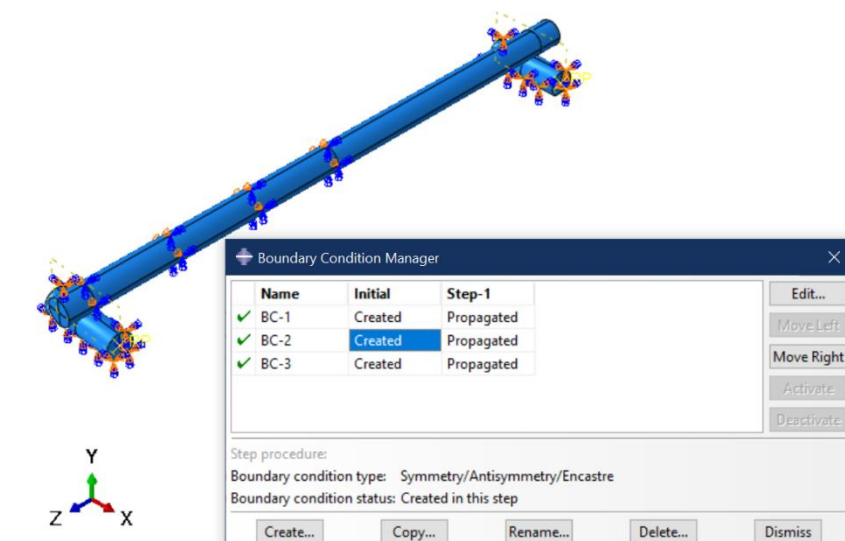
### - Đặt tải trọng tập trung tại trung điểm của dầm



Hình 3. 19 Đặt tải trọng tập trung cho dầm chịu uốn 3D

### - Thiết lập điều kiện biên:

Tại hai gối đỡ, theo lý thuyết biến dạng dầm uốn, dầm chịu uốn trong điều kiện lý tưởng. Trong hệ tọa độ được mô tả trong hình 3.19, hai điểm này chỉ xoay quanh trục z và di chuyển dọc theo trục x. Như được minh họa trong hình, mỗi điểm trong số hai điểm này bị ràng buộc bởi bốn bậc tự do. Hai gối đỡ của dầm được ràng buộc tất cả các bậc tự do.



Hình 3.20 Thiết lập điều kiện biên đối với dầm chịu uốn 3D

## 6. Mesh – Chia lưới phần tử

Đối với mô hình mô phỏng số 3D, chia lưới sẽ phức tạp hơn và kích thước lưới sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả tính toán. Đầu tiên, chúng tôi đã tiến đánh giá độ hội tụ của lưới bằng cách chọn các kích thước phần tử lần lượt là 0,5; 0,75 và 1 mm rồi tiến hành chạy thử nghiệm. Đối với trường hợp thử nghiệm mẫu có đường kính mô hình  $d$  là 6 mm và tải 50 N, sai số tối đa quan sát được là 4,7% đối với kích thước mắt lưới 0,75 mm và 1 mm, trong khi sai số tối thiểu là 2,2% đối với kích thước mắt lưới 0,5 mm và 1mm. Do đó, kích thước lưới 1 mm đã được chọn để tiến hành mô phỏng số trong nghiên cứu này.

Trong mô hình 3D, hai gối đỡ được thiết kế để mô phỏng hình dạng của những gối đỡ được sử dụng trong thí nghiệm thực tế, có dạng hình trụ có đường kính  $d=10$  mm. Hai gối đỡ này bị ràng buộc bởi 6 bậc tự do trong không gian. Để nâng cao tính ổn định trong tính toán, các ràng buộc đã được áp dụng để ngăn chặn chuyển động quay quanh trục z và trục y, cũng như chuyển động dọc theo trục x. Lưới phần tử được sử dụng là phần tử tuyến tính Hexahedral C3D8R, với kích thước 1 mm cho mỗi phần tử.



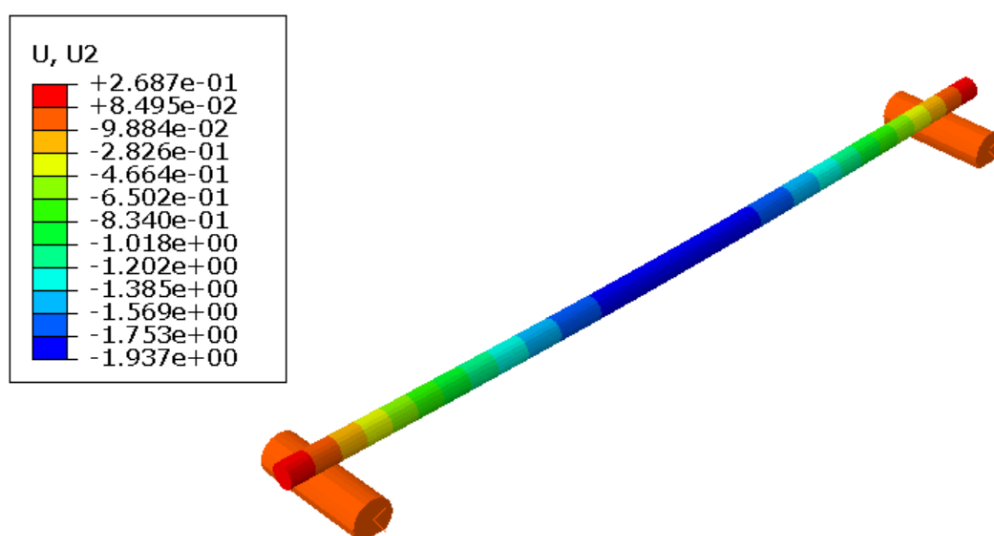


Hình 3. 21 Phân tử hữu hạn mô hình (lưới) với phần tử kích thước 1mm đối với dầm chịu uốn 3D ( $d=10\text{ mm}$ )

## 7. Kết quả mô phỏng số

Tương tự như trường hợp mô phỏng số 2D, việc thực hiện mô phỏng số được tiến hành với 3 trường hợp khác nhau về đường kính của dầm nhôm có mặt cắt ngang hình tròn theo đó đường kính lần lượt là 6 mm, 8 mm và 10 mm. Tất cả các mẫu được sử dụng để tính toán mô phỏng đều có chiều dài tiết diện uốn  $L = 200\text{ mm}$  và chịu bốn giá trị tải trọng khác nhau lần lượt là: 50N, 70N, 90N và 110N.

Dưới đây là kết quả 1 trường hợp điển hình kết quả mô phỏng số để xác định độ võng lớn nhất  $U_2$  đối với dầm  $d=6\text{ mm}$  chịu tải 50N trong FEM 3D.



Hình 3. 22 Độ võng lớn nhất  $U_2$  đối với dầm  $d=6\text{ mm}$  chịu tải 50N trong FEM 3D

### 3.3. Đánh giá và so sánh các kết quả với phương pháp tính toán phân tích

#### 3.3.1. Lập bảng so sánh

Sau khi có các kết quả ta lập bảng so sánh các kết quả mô phỏng với các kết quả với phương pháp tính toán phân tích:

*Bảng 3. 2 So sánh kết quả mô phỏng số với phương pháp tính toán phân tích*

Đường kính (mm)	Tải (N)	Tính toán FEM	Mô phỏng số	
			Chuyển vị lớn nhất (mm)	
			2D	3D
d = 6	50	1,9012	1,904	1,936
	70	2,6617	2,665	2,71
	90	3,4222	3,425	3,486
	110	4,1826	4,184	4,266
d = 8	50	0,6016	0,6037	0,5803
	70	0,8422	0,8451	0,805
	90	1,0828	1,087	1,03
	110	1,3234	1,328	1,255
d = 10	50	0,2464	0,2478	0,2406
	70	0,3450	0,3469	0,3303
	90	0,4435	0,446	0,4201
	110	0,5421	0,5451	0,5099

#### 3.3.2. Đánh giá

Kết quả tính toán lý thuyết theo cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn với mô phỏng số 2D và 3D cho thấy mức độ chính xác cao khi so sánh với kết quả thực nghiệm, đặc biệt ở vùng biến dạng đàn hồi nơi mẫu hộp kim nhôm A6061 có biểu hiện biến dạng

tuyến tính. Kết quả tính toán độ võng lớn nhất thu được qua phương pháp lý thuyết và mô phỏng số 2D, 3D đều đảm bảo, đủ tin cậy như bảng 3.3 bên dưới.

*Bảng 3. 3 Đánh giá sai số của các phương pháp tính toán và mô phỏng số*

Diameter (mm)	Load (N)	Sai số tính toán		
		2D/3D	FEM/3D	FEM/2D
6	50	1.68%	1.83%	0.15%
6	70	1.69%	1.82%	0.12%
6	90	1.78%	1.87%	0.08%
6	110	1.96%	1.99%	0.03%
8	50	3.88%	3.53%	0.36%
8	70	4.75%	4.41%	0.35%
8	90	5.24%	4.88%	0.39%
8	110	5.50%	5.17%	0.35%
10	50	2.91%	2.35%	0.57%
10	70	4.79%	4.25%	0.56%
10	90	5.81%	5.28%	0.56%
10	110	6.46%	5.93%	0.56%

### 3.4. Kết luận

Từ những xây dựng và thiết kết mô hình thiết bị đến kết quả mô phỏng số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn 2D và 3D đạt được ở chương này, như đánh giá ở trên chúng ta có thể thấy rằng các kết quả mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus® cho mô hình số 2D và 3D đều đảm bảo độ tin cậy khi so sánh với kết quả tính toán ở bảng 3.3.

Những kết quả này còn là tiền đề để sử dụng cho việc đánh giá so sánh với kết quả thực nghiệm ở chương tiếp theo.

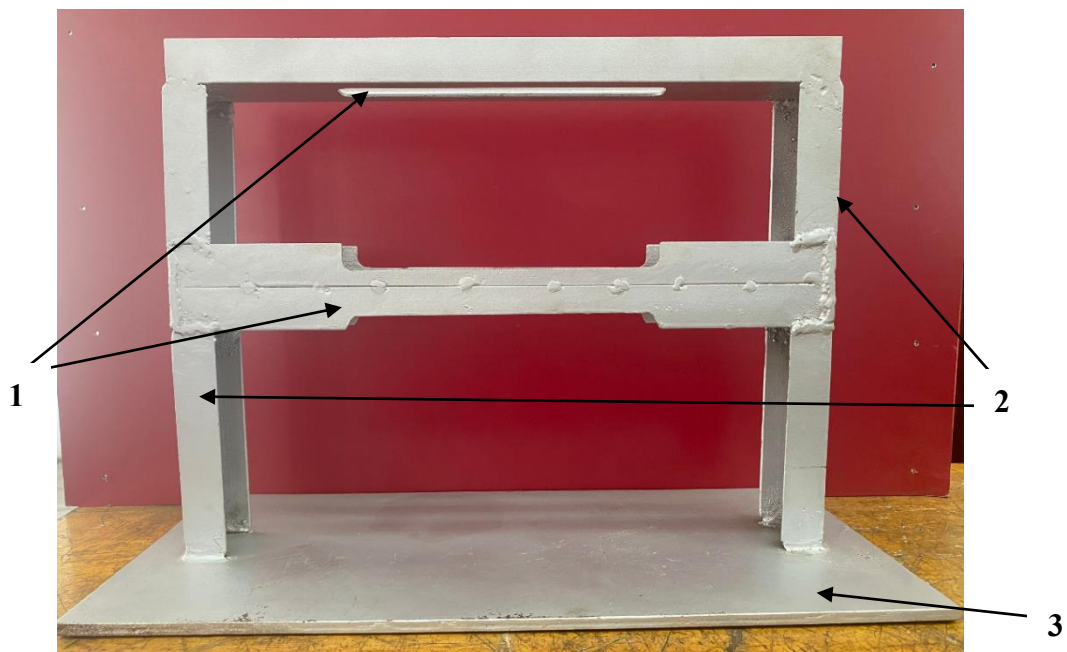
## CHƯƠNG 4. CHẾ TẠO THIẾT BỊ, THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Chương cuối này sẽ tiến hành gia công và chế tạo thiết bị hoàn chỉnh, sau đó sử dụng thiết bị này để tiến hành thực nghiệm xác định chuyển vị của dầm chịu uốn đã được tính toán và mô phỏng số ở các chương trước.

### 4.1. Chế tạo và lắp ráp mô hình

Sau quá trình tính toán và thiết kế mô hình 3D trên phần mềm Solidworks. Các chi tiết sẽ được chế tạo và lắp ráp với nhau thành một thiết bị hoàn chỉnh để sử dụng đo chuyển vị.

#### 4.1.1. Chế tạo khung đỡ



Hình 4. 1 Khung đỡ chính của thiết bị

1: Hai thanh chịu tải - 2: Hai trụ đỡ - 3: Tấm đế

#### 1. Thanh chịu tải và trụ đỡ

Hai thanh chịu tải (chiều dài 400mm) và hai trụ đỡ (chiều dài 300mm) được chế tạo từ vật liệu thép U50. Các chi tiết được chế tạo liên kết với nhau bằng phương pháp hàn hồ quang điện.

#### Thông số kĩ thuật:

- Thép hình U50 x 22 x 2.5 x 3 x 6m

- Trọng lượng: 13.5 kg / cây
- Mác thép: SS400 – A36 – CT3 – Q235B
- Tiêu chuẩn chất lượng: ATSM A36, JIS G3101, 3010, SB410, GOST 380 – 88

#### **Ưu điểm:**

- Kích thước đa dạng, phù hợp với nhiều mục đích sử dụng
- Độ bền cao, chịu được tác động của thời tiết
- Chịu lực tốt, ít bị biến dạng do tác động của ngoại lực
- Dễ vận chuyển, thi công, lắp đặt và bảo trì
- Chi phí thấp

#### **Tạo rãnh trên thanh chịu tải:**



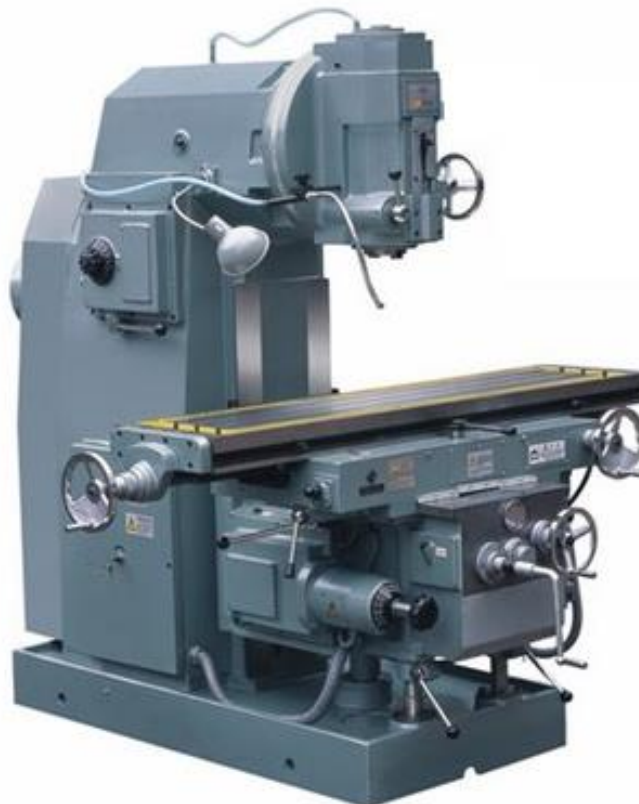
*Hình 4. 2 Thanh chịu tải*

Hai thanh chịu tải được tạo rãnh chữ nhật có kích thước 20×300mm sử dụng máy phay đứng 6H11, có chức năng giúp cho ray trượt và gối đỡ có thể di chuyển tùy chỉnh khoảng cách trong các trường hợp thí nghiệm theo yêu cầu.

*Bảng 4. 1 Thông số kỹ thuật của máy phay 6H11*

Công suất động cơ trục chính	4,5 Kw
Công suất động cơ chạy dao	1,7 Kw
Phạm vi điều chỉnh (vòng/phút)	65÷1800
Số cấp tốc độ	16
Phạm vi điều chỉnh lượng chạy dao	23,5÷1180
Xích chạy sao nhanh: dọc x ngang x đứng (mm/ph)	2900, 2300, 1150

Kích thước máy (phủ bì) (mm)	2060x1530x2300
Khối lượng máy (kg)	2100



Hình 4. 3 Máy phay đứng 6H11

#### Công nghệ chế tạo:

Phay rãnh: Kích thước cần đạt được rãnh 20×300 (mm)

+ Chọn dụng cụ cắt:

Ta chọn dao phay ngón chuôi trụ có kích thước như sau:  $d=12(\text{mm})$ ,  $L=47(\text{mm})$ ,  $l=13(\text{mm})$ ,  $z=4(\text{ren})$

+ Chế độ cắt:

Khi gia công Phay mặt ta chọn chiều sâu cắt  $t=1 \text{ mm}$ , ta chọn bước tiến dao  $S_z=0.02(\text{mm}/\text{rãnh})$ ; lượng chạy dao vòng  $S_0=0,02.5=0.1(\text{mm}/\text{vòng})$ ; chọn tốc độ cắt  $V_b=40(\text{m}/\text{ph})$ .

Các hệ số hiệu chỉnh và tính toán tốc độ cắt  $V_t=V_b.k_1.k_2.k_3=0.9 \times 0.8 \times 1 \times 40=28,8(\text{m}/\text{phút})$ .

## 2. Tấm đế

Tấm đế (kích thước 185×450 mm) vật liệu sử dụng là thép tấm dày 8mm.

### Thông số kỹ thuật theo tiêu chuẩn:

- Độ dày: 8mm
- Khổ rộng: Có thể là 1500mm, 2000mm hoặc 6000mm.
- Khổ dài: Có thể là 6000mm, 9000mm hoặc 12000mm.

## 3. Liên kết bằng phương pháp hàn hồ quang điện

Các chi tiết cấu thành khung đỡ được chế tạo liên kết với nhau bằng phương pháp hàn hồ quang điện.

### Ưu điểm của hàn hồ quang điện

- Tiết kiệm kim loại.
- Giảm được thời gian và giá thành chế tạo kết cấu.
- Hàn có thể nối được những kim loại có tính chất khác nhau.
- Thiết bị hàn tương đối đơn giản và dễ chế tạo.
- Kết cấu tại mối hàn có độ bền rất cao.
- Giảm được tiếng động khi sản xuất.

### Yêu cầu kỹ thuật mối hàn

Trước khi hàn phải làm sạch các mép mối hàn và phần kim loại nằm kề bên đến khi thấy ánh kim. Chiều rộng khoảng làm sạch tối thiểu là 10 mm mỗi bên. Phải tẩy sạch xỉ hàn lớp trước mới được hàn lớp sau.

### Mối hàn đảm bảo an toàn

- Khi kiểm tra đo đạc bên ngoài không có.
  - Vết nứt bề mặt mối hàn và phần kim loại nóng chảy.
  - Chỗ gãy góc, lệch mép.
  - Sai lệch kích thước, hình dạng mối hàn, cùng như phần lồi tăng bên.
  - Không nứt trong kim loại nóng chảy cũng như trong các vùng chịu ảnh hưởng nhiệt của kim loại cơ bản.
  - Không có chỗ hàn không ngấu giữa các lớp hàn với bìa mép.

- Không có chỗ hàn thiếu ở chân mối hàn quá 15% chiều dày thành hoặc quá 3mm nếu thành dày trên 20mm đối với sản phẩm chỉ hàn một phía.
- Không có lỗ xóp và ngậm xỉ quá 5 vết/1cm<sup>2</sup> với kích thước mỗi khuyết vật không quá 1,5mm và tổng của chúng không quá 3mm.
- Không có vết nứt, rạn phần cấu tạo làm giảm tính đàn hồi và tính dẻo của kim loại.

### Tính toán kết cấu mối hàn

Trong quá trình lắp ráp máy ta sử dụng phương pháp hàn hồ quang điện trong đó liên kết mối hàn giữa trụ đỡ và thanh chịu tải là hàn góc, đó hai chi tiết quan trọng có tác dụng chịu lực khi tiến hành thí nghiệm nên phải được chắc chắn đảm bảo an toàn của kết cấu mối hàn liên kết.

**Khả năng chịu lực của liên kết hàn được tính theo công thức sau [19]:**

$$F = t_w * T * L_w \quad (4.1)$$

Trong đó:

F – Khả năng chịu lực của liên kết hàn, tính bằng đơn vị Niuton (N);

$t_w$  – Cường độ tính toán khi cắt của kim loại hàn, tính bằng MPa:  $t_w = 115$  MPa (kim loại hàn có giới hạn chảy nhỏ hơn 410 MPa);

T – Chiều dày tính toán của mối hàn, tính bằng milimet (mm) T = 2(mm);

$L_w$  – Chiều dài đường hàn, tính bằng milimet (mm). Ta có liên kết hàn xung quanh trụ đỡ :  $L_w = 50+22*2 = 94$  (mm);

$$F = 115*2* 94 =21620 \text{ (N)}$$

#### 4.1.2. Chế tạo ray trượt



Hình 4. 4 Mô hình chế tạo của ray trượt



## 1. Ray trượt vuông

Ray trượt vuông (chiều dài 50mm) sử dụng thép vuông 20×20×1. Ray trượt vuông và tấm ray tùy động trên được liên kết với nhau bằng phương pháp hàn hồ quang điện.

**Vật liệu sử dụng: Thép hộp vuông 20 x 20 x 1.0 - mác thép AH36**

**Thông số kỹ thuật :**

- Kích thước: 20mm x 20mm
- Độ dày: 1.0mm
- Chiều dài tiêu chuẩn: 6m
- Trọng lượng: khoảng 2.45 kg đến 6.5 kg tùy thuộc vào độ dày và loại thép.
- Mác thép AH36 là loại thép cấu trúc sử dụng trong ngành đóng tàu, có các đặc tính cơ lý như:

Giới hạn chảy tối thiểu: 355 N/mm<sup>2</sup>

Giới hạn bền kéo tối thiểu: 490 - 620 N/mm<sup>2</sup>

Thép hộp vuông AH36 thường được sử dụng trong các ứng dụng đòi hỏi độ bền cao và khả năng chịu lực tốt, như xây dựng cầu, tàu biển...

## 2. Tấm ray tùy động

Hai tấm ray có kích thước 40×75 (mm) sử dụng thép tấm cán nóng dày 3mm. Hai tấm ray được cố định trên khung đỡ bằng bulông M8.



*Hình 4. 5 Tấm ray tùy động*

Hai tấm ray tùy động được tạo lỗ vuông 18×18mm bằng máy phay kí hiệu 6H11 và khoan 2 lỗ d=8,5 và sử dụng máy khoan 2A125 để khoan lỗ rồi taro ren.

- **Phay rãnh : Kích thước cần đạt được 18×18 (mm)**

+ Chọn dụng cụ cắt:

Ta chọn dao phay ngón chuỗi trụ có kích thước như sau:

$d=12(\text{mm})$ ,  $L=47(\text{mm})$ ,  $l=13(\text{mm})$ ,  $z=4(\text{răng})$

+ Chế độ cắt:

Khi gia công rãnh ta chọn chiều sâu cắt  $t=1 \text{ mm}$

Chọn bước tiến dao  $S_z=0.02(\text{mm/răng})$

Lượng chạy dao vòng  $S_0=0,02.5=0.1(\text{mm/vòng})$

Chọn tốc độ cắt  $V_b = 20(\text{m/ph})$

Các hệ số hiệu chỉnh:

- Hệ số phụ thuộc vào độ cứng của chi tiết gia công  $k_1=0.9$ ;
- Hệ số phụ thuộc vào trạng thái bề mặt  $k_2=0.8$ ;
- Hệ số phụ thuộc vào tuổi bền của dao  $k_3=1$ ;

Như vậy tốc độ tính toán là  $V_t=V_b.k_1.k_2.k_3=0.9 \times 0.8 \times 1 \times 20 = 14,4(\text{m/phút})$

- **Khoan, sử dụng mũi khoan ruột gà mm Ø8 làm bằng thép gió**

**Chiều sâu cắt :  $t=3,35\text{mm}$ .**

Lượng chạy dao  $S=0,14\text{mm}$ , chọn theo máy  $S=0,13\text{mm/vòng}$

Tốc độ cắt  $V=17,7\text{m/phút}$ .

Các hệ số điều chỉnh :

- + Theo tuổi bền của dao  $k=1$ ;
- + Theo chiều sâu lỗ  $k=0.85$ ;
- + Theo vật liệu mũi khoan  $k=1$

Vậy tốc độ cắt:

$$V_t=17,7.0,85=15\text{m/phút}$$

Tốc độ trục chính:

$$n_t = \frac{1000.V_t}{\pi D} = \frac{1000.15}{3,14.8} = 597 \text{ v/phút}$$

Chọn theo máy  $n_m=600\text{v/phút}$

$$\text{Vậy } V_{tt} = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{3,14.8.600}{1000} = 15\text{mm/phút}$$

### 4.1.3. Thiết kế khối đặt tải



Hình 4. 6 Mô hình chế tạo khối đặt tải

#### 1. Tấm đặt tải

Tấm đặt tải có kích thước  $120 \times 120$  (mm) sử dụng thép tấm dày 3 mm. Tấm đặt tải liên kết với thanh trượt bằng phương pháp hàn hồ quang - hàn que.

**Vật liệu sử dụng: Thép tấm (Q355B) dày 3mm bao gồm:**

##### Thông số kỹ thuật:

- Độ dày: 3mm
- Khô rộng: Có thể là 1500mm, 2000mm hoặc 6000mm.
- Khô dài: Có thể là 6000mm, 9000mm hoặc 12000mm.
- Mác thép: Q355B
- Về mặt cấu trúc và thành phần hóa học, thép Q355B có các đặc tính sau:

Cường độ năng suất tối thiểu: 355 MPa

Độ bền kéo: 470-630 MPa

- Thành phần hóa học (Phần trăm khối lượng,  $\leq$ ): C: 0.24, Si: 0.55, Mn: 1.6, P: 0.035, S: 0.035, Cr: 0.30, Ni: 0.30, Cu: 0.40, N: 0.0122.

## 2. Thanh trượt

Ống dẫn hướng có chiều dài 170 mm, sử dụng thép vuông 18×18×1,8 mm.

**Vật liệu sử dụng: Thép vuông có kích thước 18×18×1,8 mác thép SPCC**

Thông số kỹ thuật:

- Thép cán nguội theo tiêu chuẩn JIS-G3134 của Nhật Bản
- Độ dày: 1,8 mm
- Kích thước: 18×18 mm
- Mác thép: SPCC
- Mác thép SPCC thường có các thông số kỹ thuật sau:
- Tiêu chuẩn cơ lý:

Độ bền kéo tối thiểu là 270N/mm<sup>2</sup> (MPa).

Độ giãn dài tối thiểu từ 27% đến 31%, tùy thuộc vào độ dày của thép.

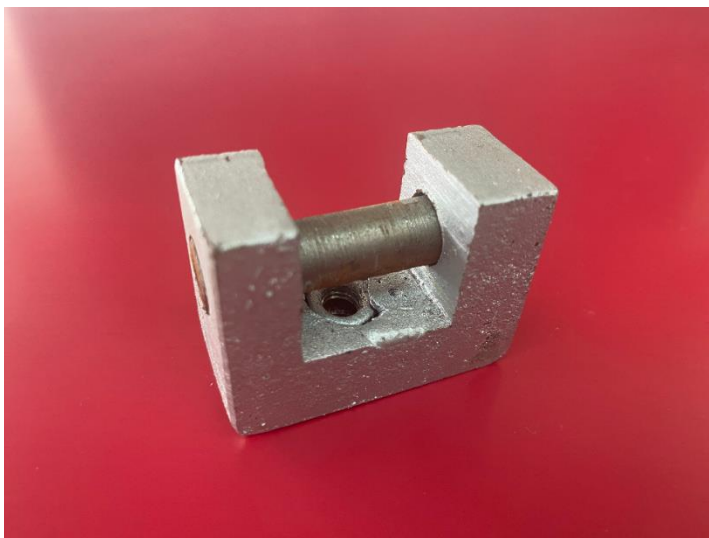
## 3. Gối đặt lực

Gối đặt lực được cấu tạo từ khối thép chữ U và một trụ đặt lực sử dụng vật liệu Inox tròn đặc SUS304 (d = 8 mm). Các chi tiết được thiết kế và chế tạo liên kết với nhau bằng phương pháp hàn hồ quang điện.



*Hình 4. 7 Gối đặt lực*

#### 4.1.4. Chế tạo gôi đỡ



Hình 4. 8 Mô hình chế tạo gôi đỡ

##### 1. Thanh gôi đỡ

Gôi đỡ hình trụ có chiều dài 42 mm đường kính  $d = 10$  mm

**Vật liệu sử dụng: Inox tròn đặc SUS304 với đường kính 10 mm .**

**Thông số kỹ thuật :**

- Mác thép: SUS304
- Đường kính: 10 mm
- Chiều dài tiêu chuẩn: 6000 mm
- Thành phần hóa học:

Cacbon ©:  $\leq 0.08\%$

Silic (Si):  $\leq 1.00\%$

Mangan (Mn):  $\leq 2\%$

Niken (Ni): 8-10.5%

Crom (Cr): 18.00-20.00%

Phốt pho (P):  $\leq 0.045\%$

Lưu huỳnh (S):  $\leq 0.030\%$

- Tính chất cơ lý:

Độ bền kéo đứt: 520 N/mm<sup>2</sup>

Độ bền nén: 45 N/mm<sup>2</sup>

Giới hạn chảy: 240 N/mm<sup>2</sup>

Độ dẫn dài tương đối: 30%

Độ cứng (HB): 85

## 2. Khối thép chữ U

Khối thép chữ U có chiều dài 20mm kích thước 36×42×8, được tạo rãnh 20×30mm bằng máy phay kí hiệu 6H12. Khoan lỗ có đường kính 10mm để lắp thanh gối đỡ và lỗ có đường kính 6,7 để có cố định gối đỡ vào khung đỡ. Các chi tiết được thiết kế và chế tạo liên kết với nhau bằng phương pháp hàn hồ quang - hàn que. Gối đỡ được cố định với khung đỡ bằng bulong M6.

**Vật liệu sử dụng: Thép vuông đặc S45C với kích thước 42x42 mm**

### Thông số kỹ thuật :

- Mác thép: S45C
- Tiêu chuẩn: JIS G4051 – DIN 12344 – DIN 12363 – DIN 12379 – KS D3752 – DIN 1.7225 – GB/T 3077
- Ứng dụng: Thép vuông đặc S45C thường được sử dụng làm khuôn đúc, khuôn rèn, dập thể tích, thao tác nhiệt, linh kiện điện tử, container, sản phẩm quang học, máy ảnh, phụ tùng xe hơi.
- Xuất xứ: Trung Quốc, Nhật Bản, Hàn Quốc, Châu Âu, Đài Loan
- Kích thước: Dày 8 mm
- Khối lượng: Dựa trên công thức tính khối lượng thép vuông đặc, khối lượng của thép vuông đặc S45C kích thước 42x42 mm là tương đương với 13.85 kg/m.

### Tạo rãnh bằng máy phay kí hiệu 6H11

Phay rãnh : Kích thước cần đạt được 20×30 (mm)

+ Chọn dụng cụ cắt:

Ta chọn dao phay ngón chuôi trụ có kích thước như sau:

d=12(mm), L=47(mm), l=13(mm), z=4(răng)

+ Chế độ cắt:

Khi gia công rãnh ta chọn chiều sâu cắt  $t=1$  mm

Chọn bước tiến dao  $S_z=0.02$ (mm/ren)

Lượng chạy dao vòng  $S_0=0,02.5=0.1$ (mm/vòng)

Chọn tốc độ cắt  $V_b=40$ (m/ph)

Các hệ số hiệu chỉnh:

- Hệ số phụ thuộc vào độ cứng của chi tiết gia công  $k_1=0.9$
- Hệ số phụ thuộc vào trạng thái bề mặt  $k_2=0.8$
- Hệ số phụ thuộc vào tuổi bền của dao  $k_3=1$

Như vậy tốc độ tính toán là  $V_t=V_b.k_1.k_2.k_3=0.9 \times 0.8 \times 1 \times 40 = 28,8$ (m/phút)

• **Khoan, sử dụng mũi khoan ruột gà mm Ø6,7 làm bằng thép gió**

**Chiều sâu cắt :  $t=3,35$ mm.**

Lượng chạy dao  $S=0,14$ mm, chọn theo máy  $S=0,13$ mm/vòng

Tốc độ cắt  $V=17,7$ m/phút. Các hệ số điều chỉnh :

- + Theo tuổi bền của dao  $k=1$ ,
- + Theo chiều sâu lỗ  $k=0.85$ ,
- + Theo vật liệu mũi khoan  $k=1$

Vậy tốc độ cắt:

$$V_t=17,7.0,85=15\text{m/phút}$$

Tốc độ trục chính:

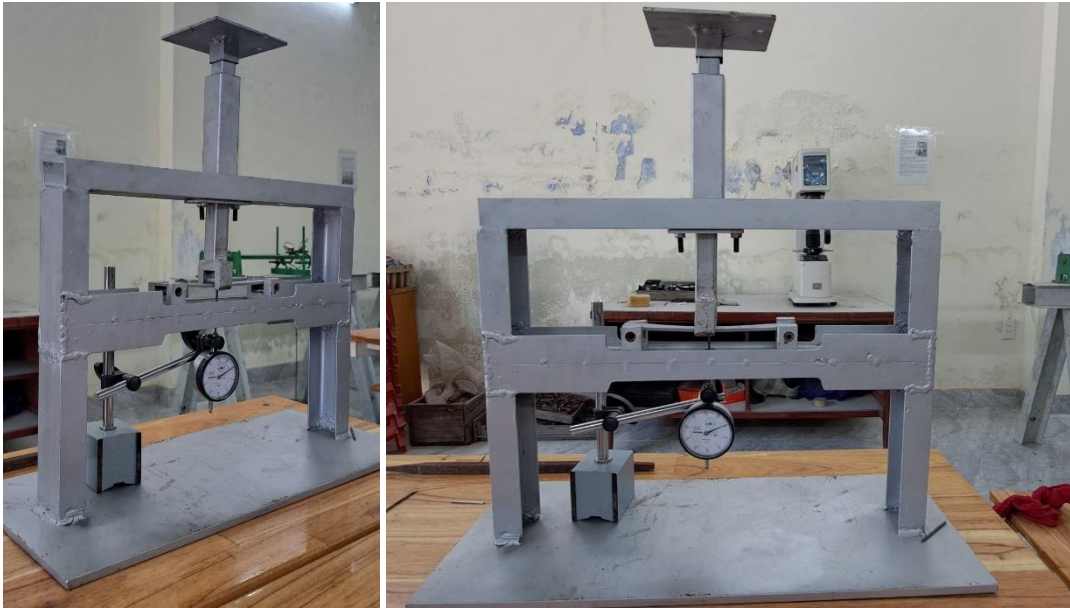
$$n_t = \frac{1000.Vt}{\pi D} = \frac{1000.15}{3,14.6,7} = 713 \text{ v/phút}$$

Chọn theo máy  $n_m=680$ v/phút

$$\text{Vậy } V_{tt} = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{3,14.6,7.680}{1000} = 14,3 \text{ m/phút}$$

#### 4.1.5. Lắp ráp máy hoàn chỉnh.

Sau khi chế tạo xong các cụm chi tiết và chi tiết cần thiết, ta tiến hành lắp ráp cụm chi tiết, lắp ráp hoàn chỉnh thiết bị dựa trên các chuẩn định vị lắp ráp giữa các cụm chi tiết theo thiết kế.



Hình 4. 9 Thiết bị đo chuyển vị của dầm chịu uốn

Sau khi chế tạo xong các bộ phận của thiết bị, chúng tôi tiến hành lắp đầy đủ các chi tiết còn lại vào khung đỡ: Ray trượt, khối chịu tải, gối đỡ. Các cụm chi tiết đó được lắp ráp liên kết với nhau bằng mối ghép ren và phương pháp hàn hồ quang điện.

#### 4.2. Thực nghiệm xác định độ võng

##### 4.2.1. Vật mẫu thí nghiệm

Các thí nghiệm được thực hiện bằng cách sử dụng dầm tiết diện tròn làm bằng hợp kim nhôm A6061. Tất cả các mẫu được sử dụng để tính toán thực nghiệm và mô phỏng đều có chiều dài tiết diện uốn  $L = 200$  mm. Các mẫu này có mặt cắt ngang hình tròn với đường kính lần lượt là 6 mm, 8 mm và 10 mm.



Hình 4. 10 Dầm nhôm A6061

Bảng 4. 2 Các đặc tính cơ lý của A6061

Tính chất vật lý	Hệ mét
Tỉ trọng	2,7 g/cm <sup>3</sup>



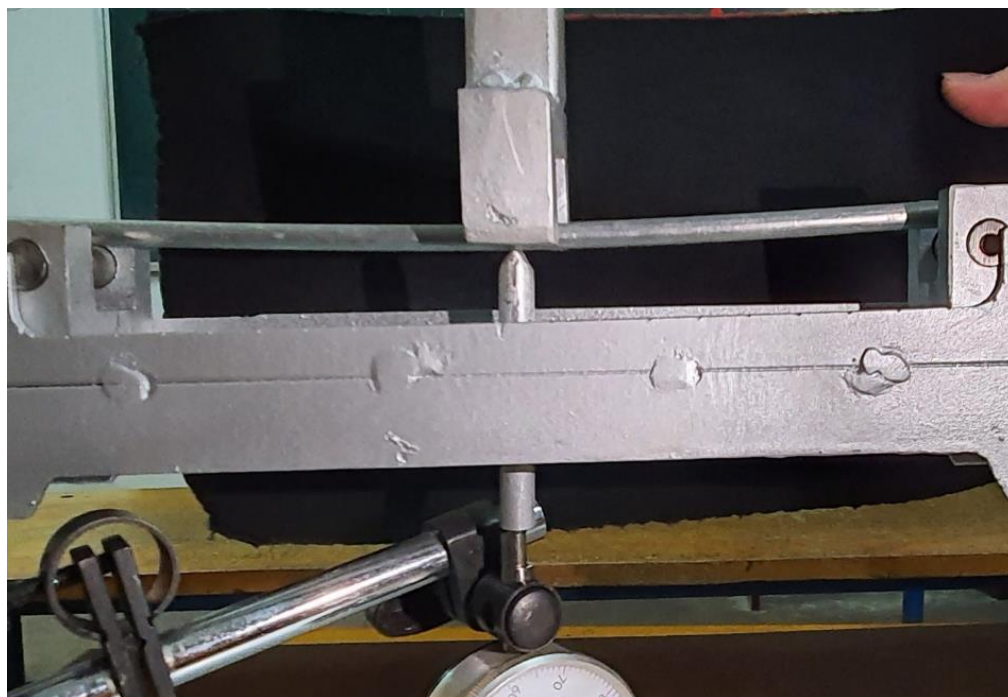
<b>Tính chất cơ học</b>	
Độ cứng, Brinell	95
Độ cứng, Knoop	120
Độ cứng, Rockwell A	40
Độ cứng, Rockwell B	60
Độ cứng, Vickers	107
Độ bền kéo	310 MPa
Sức mạnh năng suất bền kéo	276 MPa
Độ giãn dài khi đứt	12%
Độ giãn dài khi đứt	17 %
Mô đun đàn hồi	68,9 GPa
Độ bền kéo	324 MPa
Sức mạnh chịu lực tối đa	607 MPa
Sức mạnh năng suất mang	386 MPa
Tỷ lệ Poisson	0,33

#### **4.2.2. Tiến hành thí nghiệm:**

Tiến hành 3 trường hợp thí nghiệm trên các mẫu – dầm nhôm A6061 có mặt cắt ngang hình tròn với đường kính lần lượt là 6 mm, 8 mm và 10 mm Mỗi dầm chịu bốn giá trị tải trọng khác nhau: 50N, 70N, 90N và 110N trên thiết bị uốn 3 điểm được thiết kế riêng.

#### **Các bước tiến hành thí nghiệm:**

- Bước 1: Điều chỉnh thiết bị theo yêu cầu thí nghiệm: điều chỉnh khối đặt tải về giữa thiết, điều chỉnh khoảng cách hai gối đỡ với khoảng cách 200mm.
- Bước 2: Đưa vật mẫu – dầm nhôm vào thiết bị: đặt vật mẫu lên hai gối đỡ căn chỉnh khoảng cách cân đối giữa dầm và 2 gối đỡ, đặt gối tải lên dầm. kiểm tra lại khoảng cách các điểm tiếp xúc đảm bảo độ chuẩn xác cho quá trình thực nghiệm đo.
- Bước 3: Đặt đầu đo di chuyển của đồng hồ so có điểm tiếp xúc vừa đủ chạm vào vật mẫu và có vị trí trung điểm giữa hai gối đỡ hay trùng với điểm tác dụng lực. Sau đó nhẹ nhàng xoay mặt chỉ độ sao cho kim đồng hồ nằm ở vị trí số 0, sẵn sàng bắt đầu thí nghiệm.
- Bước 4: Nhẹ nhàng đặt tải lên tấm chịu tải tiến hành thí nghiệm. Sau đặt tải ổn định chờ kim đồng hồ so dừng lại hoàn toàn ta được chuyển vị cần đo. Ghi lại kết quả thí nghiệm thông số chuyển vị .
- Bước 5: Thêm các lượng tạ phù hợp với yêu cầu của trường hợp thí nghiệm kiểm tra. Thay các vật dầm có các kích thước khác để tiến hành các trường hợp kiểm tra còn lại thu thập kết quả chuyển vị.



Hình 4. 11 Thực nghiệm trên thiết bị thực tế

### 4.2.3. Kết quả thực nghiệm xác định độ võng

Bảng 4. 3 Kết quả thực nghiệm của dầm nhôm

Đường kính (mm)	Tải (N)	Cuộc thí nghiệm (Kết quả trung bình của ba lần đo)
d = 6	50	1,86
	70	2,57
	90	3,32
	110	4,15
d = 8	50	0,56
	70	0,75
	90	0,98
	110	1,18
d = 10	50	0,25
	70	0,34
	90	0,43
	110	0,53

### 4.3. Đánh giá, so sánh kết quả

#### 4.3.1. Lập bảng so sánh

Sau khi hoàn thành toàn bộ thí nghiệm ta lập bảng so sánh kết quả chuyển vị tính toán, mô phỏng và thực nghiệm của dầm nhôm tiết diện tròn (mm)

Bảng 4. 4 Kết quả chuyển vị tính toán, mô phỏng và thực nghiệm của dầm nhôm tiết diện tròn (mm)

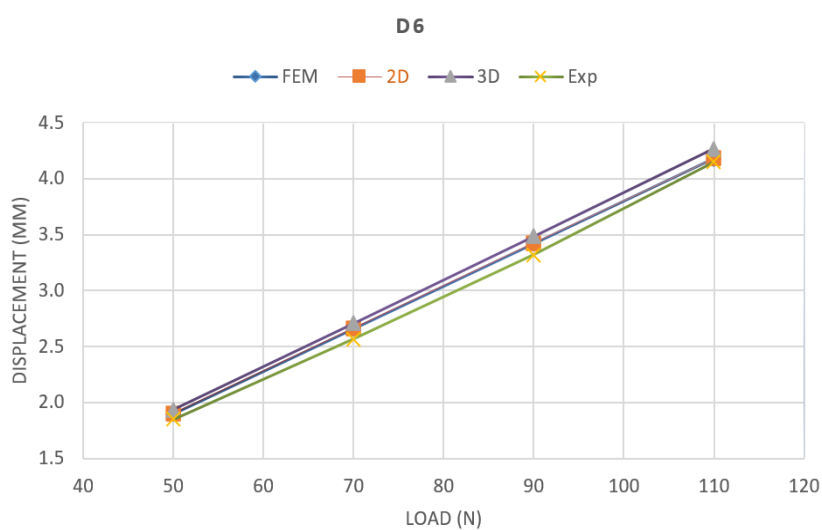
Đường kính (mm)	Tải (N)	Phép tính	Mô phỏng		Cuộc thí nghiệm  (Kết quả trung bình của ba lần đo)
			2D	3D	

d = 6	50	1.9012	1.904	1.936	1,86
	70	2.6617	2,665	2,71	2,57
	90	3.4222	3.425	3.486	3,32
	110	4.1826	4.184	4.266	4,15
d = 8	50	0,6016	0,6037	0,5803	0,56
	70	0,8422	0,8451	0,805	0,75
	90	1.0828	1.087	1,03	0,98
	110	1.3234	1.328	1.255	1,18
d = 10	50	0,2464	0,2478	0,2406	0,25
	70	0,3450	0,3469	0,3303	0,34
	90	0,4435	0,446	0,4201	0,43
	110	0,5421	0,5451	0,5099	0,53

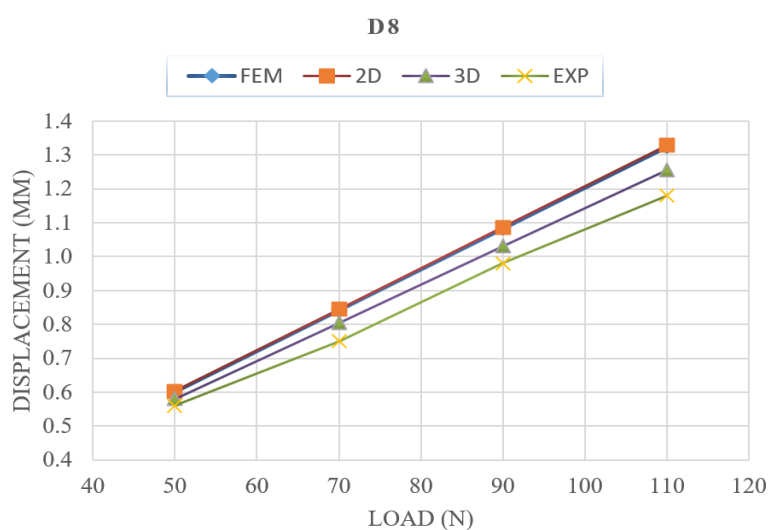
#### 4.3.2. Đánh giá

Với các kết quả tính toán, mô phỏng và thực nghiệm thu thập được, có thể khẳng định nghiên cứu đã đạt được thành công mục tiêu ban đầu. Kết quả tính toán và mô phỏng cho thấy mức độ chính xác cao khi so sánh với kết quả thực nghiệm, đặc biệt ở vùng biến dạng đàn hồi nơi mẫu làm bằng hợp kim nhôm A6061 có biểu hiện biến dạng tuyến tính. Kết quả tính toán chuyển vị thu được qua phương pháp lý thuyết và mô phỏng 2D cho thấy sai lệch rất nhỏ, sai lệch tối đa khoảng 0,01 mm (Bảng 4.3). Trong khi đó, kết quả tính toán chuyển vị dựa trên mô phỏng 3D cho thấy sai số lớn hơn, với độ lệch tối đa khoảng 0,05 mm. Có thể dễ dàng nhận thấy rằng độ dịch chuyển đo được trong thực nghiệm lớn hơn kết quả thu được từ tính toán lý thuyết và mô phỏng. Tuy nhiên, trên tất cả các mẫu và tải, sự khác biệt giữa thử nghiệm và mô phỏng 3D nhìn chung là nhỏ, dao động từ tối thiểu 1,82% đến tối đa 5,93% (giữa mô hình FEM và 3D)

và từ 2,36% đến tối đa 6,83% ( giữa mô hình 3D và EXP). Sự khác biệt đáng kể nhất xảy ra trong trường hợp mẫu có đường kính  $d = 6 \text{ mm}$  và tải  $F = 110 \text{ N}$ , trong đó biến dạng dẻo xảy ra vượt quá giới hạn đàn hồi, dẫn đến thay đổi hình dạng sau khi dỡ tải. Ngoài trường hợp đặc biệt này, sự khác biệt trong các kích bản còn lại dao động từ 0% đến 4%. Độ dịch chuyển liên quan đến các tải trọng khác nhau, được xác định thông qua các tính toán lý thuyết, mô phỏng 2D và 3D, cũng như các phép đo thực nghiệm đối với các mẫu thử có đường kính 6 mm, 8 mm và 10 mm, lần lượt được thể hiện trên Hình 10 và 11.

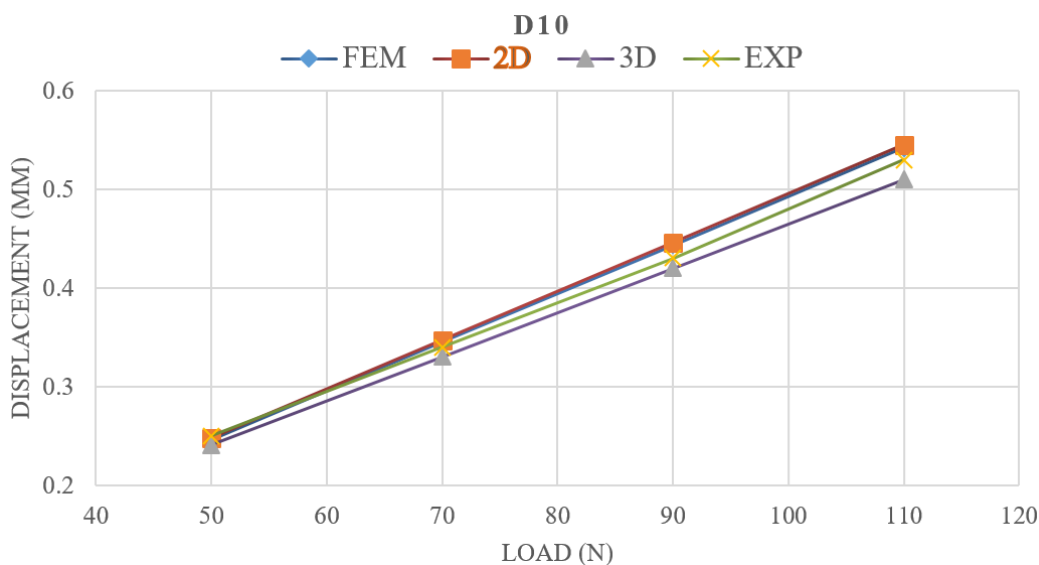


(a)



(b)

Hình 4. 12 Độ dịch chuyển của mẫu có đường kính = 6 mm (a) và đường kính = 8 mm (b)



Hình 4. 13 Độ dịch chuyển của mẫu có đường kính = 10 mm

#### 4.4. Kết luận và hướng phát triển của đề tài

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã áp dụng cho trường hợp vật liệu là hợp kim nhôm A6061 để kiểm tra bằng ba phương pháp tính toán phân tích dựa trên lý thuyết cơ học vật rắn biến dạng và sức bền vật liệu, mô phỏng số bằng phần tử hữu hạn và thực nghiệm trên thiết bị được chế tạo sử dụng đồng hồ sơ với bài toán uốn 3 điểm. Độ chính xác của kết quả tính toán và mô phỏng là rõ ràng, đặc biệt là ở vùng biến dạng đàn hồi, trong đó mẫu nhôm A6061 hiển thị biến dạng tuyến tính, được quan sát so với kết quả thực nghiệm.

Theo kết quả nghiên cứu, việc dự đoán chuyển vị trong các mẫu chịu lực thông qua phương pháp tính toán và mô phỏng tỏ ra có độ chính xác cao. Do đó, có thể khẳng định rằng việc dự đoán các đại lượng vật lý khác nhau như ứng suất và biến dạng thông qua các phương pháp này là đáng tin cậy. Một số yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác của tính toán và mô phỏng. Thứ nhất, đặc tính của vật liệu sử dụng phải phù hợp với đặc tính của mẫu thật. Thứ hai, trong quá trình mô phỏng, điều quan trọng là phải thiết lập chính xác tải trọng và các điều kiện biên để phù hợp với hoàn cảnh thực tế và đặc biệt là số lượng phần tử của mô hình. Thứ ba, thiết bị kiểm tra phải đảm bảo yêu cầu về độ chính xác.

Trong thực tế, mô phỏng số nổi bật như một phương pháp hữu ích và đáng tin cậy với sai số tối thiểu. Khi xử lý các bộ phận phức tạp, các phương pháp tính toán lý thuyết

có thể không đủ để đánh giá hoặc dự đoán chuyển vị, ứng suất và biến dạng. Trong những trường hợp như vậy, phương pháp phần tử hữu hạn trở thành giải pháp then chốt cho kết quả gần đúng. Bằng cách dựa vào một số mô hình mô phỏng đơn giản, người ta có thể xác định mô hình chính xác nhất cho mẫu vật liệu. Các tiêu chí, dữ liệu và phương pháp của mô hình này có thể được phát triển hơn nữa và áp dụng vào việc phân chia lưới và mô phỏng các mô hình phức tạp.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Hosseini, D. Mostofinejad, and M. Hajjalilue-Bonab, “Displacement Measurement of Bending Tests Using Digital Image Analysis Method”, *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 2012, Vol. 4, No. 5, pp. 642-644; DOI: 10.7763/IJET.2012.V4.451
- [2] C-C. Tsao\*, Y-C. Tseng, Y-S. Chen, W-H. Chang and L-T. Huo, “Precision Low-Cost Compact Micro-Displacement Sensors Based on a New Arrangement of Cascaded Levers with Flexural Joints”, *Sensors* 2023, 23(1), 326; <https://doi.org/10.3390/s23010326>.
- [3] Y. Zhang, H. Tang\*, C. Li\*, G. Lu, Y. Cai, J. Zhang and F. Tan “Design and Testing of a Flexible Inclinometer Probe for Model Tests of Landslide Deep Displacement Measurement” *Sensors* 2018, 18(1), 224; <https://doi.org/10.3390/s18010224>.
- [4] M.-N. Su, B. Young, and L. Gardner, “Deformation-based design of aluminium alloy beams,” *Engineering structures*, vol. 80, pp. 339–349, 2014.
- [5] D. Jindra, Z. Kala, J. Kala, and S. Seitzl, “Experimental and numerical simulation of a three-point bending test of a stainless steel beam,” *Transportation Research Procedia*, vol. 55, pp. 1114–1121, 2021.
- [6] Tào Quang Bằng, Bùi Hệ Thống “Xác định trường biến dạng trên toàn bộ chi tiết mối hàn bằng phương pháp tương quan ảnh số”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng* 2018, 11(132), 1-4; ISSN 1859-1531
- [7] Trương Hoài Chính, Đào Ngọc Thế Lực “Kỹ thuật đo chuyển vị kết cấu bê tông sử dụng camera”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng* 2017, 5(114), 13-16; ISSN 1859-1531.
- [8] INSTRON, “Bend and flexural testing an introduction”, cập nhật ngày 4/5/2024; <https://www.instron.com/en/resources/test-types/flexural-testing>;
- [9] P. Carrara, “Three-point bending test - Lab course session”, 1/2024; cập nhật ngày 4/5/2024; <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/mechanical-systems/compmech-dam/documents/lab/three-point-bending.pdf>
- [10] A. Montazeria, E. Bahmanpoura and M. Safarabadia, “Three-point Bending Behavior of Foam-filled Conventional and Auxetic 3D printed Honeycombs” *Advanced Engineering Materials*, 25(17), 6/2023.
- [11] D. Jindra, Z. Kala, J. Kala, and S. Seitzl, “Experimental and numerical simulation of a three-point bending test of a stainless steel beam,” *Transportation Research Procedia*, vol. 55, pp. 1114–1121, 2021.
- [12] Nguyễn Trọng Phú, Vũ Tiên Chương, Đặng Việt Hưng, Nguyễn Bá Duẩn, “Ứng dụng điểm ảnh xác định chuyển vị của kết cấu trong quá trình thí nghiệm”, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng* 2018, 12(2), 24-30.
- [13] 3BSCITECH, “Các loại máy kéo nén vạn năng”, truy cập 5/2024. <https://wance.vn/may-do-luc-keo-dut-nen-van-nang-15p.html>.
- [14] HUST, “Máy kéo nén vạn năng”, truy cập 5/2024. <https://hustvietnam.com/san-pham/danh->



muc/thiet-bi-thu-nghiem-keo-nen-uon-xoan-van-nang-utm.

[15] PRODIAC, “Banc didactique d'étude de la flexion et de la torsion - HSM35”, truy cập 5/2024;

<https://www.prodidac.fr/Mat%E9riaux%20propri%E9t%E9s%20et%20essais/R%E9sistance%20des%20mat%E9riaux/Banc%20didactique%20d%27%E9tude%20de%20la%20flexion%20et%20de%20la%20torsion-HSM35>;

[16] DIATEC, “Banc de flexion - torsion simples ou composees”, truy cập 5/2024;

<http://www.didatec-technologie.com/MECANIQUE-APPLIQUEE/CARACTERISATION-DES-MATERIAUX/SFT-350-BANC-DE-FLEXION-TORSION-SIMPLES-OU-COMPOSEES>

[17] Technologie Services, “Banc d’essai flexion”, truy cập 5/2024;

[https://technologieservices.fr/ts\\_fr/275311.html](https://technologieservices.fr/ts_fr/275311.html);

[18] ABAQUS ® Software, <http://> <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>.

[19] TIÊU CHUẨN QUỐC GIA, TCVN 9392:2012 “Thép cốt bê tông - hàn hồ quang”.