

# Thiết kế giảm chấn kết cấu bằng hệ bể chứa đa tần có đối chiếu thí nghiệm trên bàn lắc

## Design and test of multi tuned liquid damper to control vibration of structure

> BÙI PHẠM ĐỨC TƯỜNG

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM; Email: tuongbpd@hcmute.edu.vn

### TÓM TẮT

Hiện nay, các công trình được xây dựng ngày một cao hơn, chiều cao công trình tăng dẫn đến sự nhạy cảm với các tải trọng động như gió hay động đất, điều này làm cho tải trọng ngang truyền vào công trình lớn hơn rất nhiều. Khi ấy tiết diện cột, vách lõi cốt thép trong cấu kiện tăng làm ảnh hưởng đến yếu tố thẩm mỹ cũng như chi phí xây dựng. Việc điều khiển dao động hay giảm chấn cho nhà cao tầng được đầu tư xem xét rất nhiều trong thời gian qua, trong đó bể nước mái sử dụng như thiết bị kháng chấn dạng chất lỏng với nhiều ưu điểm phù hợp điều kiện tự nhiên ở Việt Nam nên rất cần được nghiên cứu. Trong bài báo này, các thông số đặc trưng của kết cấu và thiết bị giảm chấn đa tần bằng chất lỏng (MTLD) được phân tích bằng phần mềm Ansys. Kết quả cho thấy hiệu quả giảm chấn của thiết bị này lên đến 85% trong trường hợp chống dao động điều hoà. Kết quả này rất phù hợp với thí nghiệm được kiểm chứng tại Phòng Thí nghiệm kháng chấn thuộc Khoa Xây dựng, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM.

**Từ khóa:** Động lực học kết cấu; điều khiển dao động; bể nước mái; hệ giảm chấn đa tần, kháng chấn.

### ABSTRACT

Nowadays, there are more and more high-rise buildings. Increasing building height leads to sensitivity to dynamic loads such as wind or earthquakes, which makes horizontal loads transmitted to the building much larger. At that time, the cross-section of columns, walls, and reinforcement in the structure increased, affecting the aesthetic factor as well as the construction cost. Vibration control for high-rise buildings has been much considered in recent years. Roof water tank as tuned liquid damper have many advantages and are suitable for Vietnam conditions, so it is worth studying. In this article, the characteristic of the structure and MTLD are analyzed by ANSYS software. The results show that the damping efficiency of this device is up to 85% in the case of harmonic loading. This result is consistent with the experiment on the shaking table verified at the Earthquake Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology and Education.

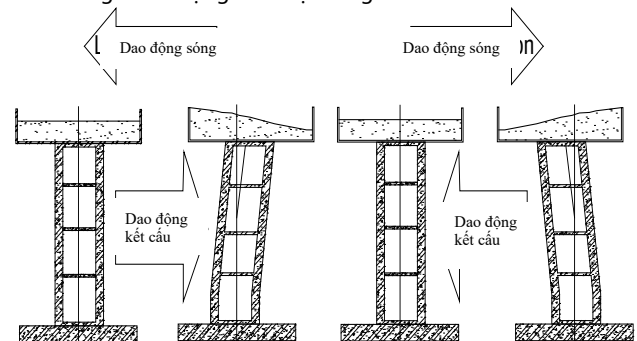
**Keyword:** dynamic structure, vibration control, roof water tank, multi-tuned liquid dampers, harmonic analysis, seismic resistance.

### 1. GIỚI THIỆU

Cơ chế hoạt động của thiết bị Tuned Liquid Dampers - TLD (Hình 1) là sử dụng lực quán tính do sóng chất lỏng hình thành bên trong bể chứa đạt đến giá trị cực đại và ngược pha với chiều chuyển động của công trình cần điều khiển khi tần số riêng của thiết bị bằng tần số riêng của công trình dẫn đến hiện tượng cộng hưởng [1].

Trong những năm qua, các chuyên gia điều khiển dao động kết cấu đã có nhiều phát triển trong việc nghiên cứu tìm hiểu về thiết bị kháng chấn dạng bị động như thiết bị cách chấn đáy, thiết bị kháng chấn bằng quả nặng (con lắc ngược) hay Tuned Mass Damper, thiết bị kháng chấn bằng chất lỏng [2]. Bể chứa chất lỏng làm việc như thiết bị kháng chấn cho thấy nhiều ưu điểm vì: chi phí thấp, dễ lắp đặt, dễ bảo trì, tốn ít không gian, có thể sử dụng như bể nước sinh hoạt và đặc biệt là ứng dụng được cho các công trình đã xây dựng mà chưa có thiết bị kháng chấn [3]. Trong bài báo này, hệ kết cấu chính sử dụng nhiều bể chứa chất lỏng (Multi tuned

liquid dampers - MTLD) và mỗi bể được mô phỏng đầy đủ hai miền rắn và lỏng. Cơ hệ được mô phỏng số nhằm khảo sát hiệu quả, so sánh sự làm việc của kết cấu dưới tác dụng của tải trọng động khi có và không có sử dụng thiết bị kháng chấn.



Hình 1. Cơ chế hoạt động TLD

## 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

### 2.1. Phương trình động lực học cơ hệ

Phương trình động lực học cho kết cấu được mô tả như sau:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F^a(t)\} \quad (1)$$

Trong đó:

$[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  = Lần lượt là ma trận khối lượng, ma trận cản và ma trận độ cứng

$\{\ddot{u}(t)\}$ ,  $\{\dot{u}(t)\}$ ,  $\{u(t)\}$  = Lần lượt là vector gia tốc, vận tốc và chuyển vị tại nút

$$\{F^a(t)\} = \text{Ngoại lực tác dụng lên cơ hệ}$$

Để giải phương trình (1), có hai phương pháp phổ biến thường dùng trên miền thời gian là: Phương pháp chống chất hàm dạng (PPCCHD) và phương pháp tích phân trực tiếp (PPTPTT) [4]. PPCCHD sẽ sử dụng tổng các hàm dạng thông qua phân tích tần số để tính toán phản ứng kết cấu. Đây là phương pháp tốn ít thời gian nhưng hầu như chỉ xét đến đặc tính tuyến tính cho kết cấu (chỉ xét phi tuyến đơn giản nút - nút ở mặt tiếp xúc) cũng như chỉ xét tương tác rắn-lỏng (fluid-structure interaction FSI) một chiều. PPTPTT còn gọi là phương pháp toàn phần - full method sẽ sử dụng toàn phần hệ ma trận để tính toán ứng xử của kết cấu theo thời gian. Đây là phương pháp tổng quát vì có xét đến các thuộc tính phi tuyến (biến dạng dẻo, biến dạng lớn do thay đổi độ cứng kết cấu), rất hiệu quả đối với mô hình dùng phần tử SOLID trong ANSYS và có khả năng xét FSI hai chiều. Và đây là phương pháp sử dụng trong nghiên cứu này.

Trong các phương pháp số hiện đại nhằm tìm nghiệm cho phương trình (1) có thể kể đến như Houbolt, Wilson, Hilber - Hughes - Taylor, Newmark ... Trong đó, giải thuật Newmark được sử dụng rộng rãi và hiệu quả nhất do sử dụng thuật toán một bước [5]. (1) được viết lại:

$$[M]\{\ddot{u}_{n+1}\} + [C]\{\dot{u}_{n+1}\} + [K]\{u_{n+1}\} = \{F_{n+1}^a\} \quad (2)$$

Với:

$\{\ddot{u}_{n+1}\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\}$ ,  $\{u_{n+1}\}$  = Vector gia tốc, gia tốc và chuyển vị tại nút ở thời gian  $t_{n+1}$

$\{F_{n+1}^a\}$  = Vector tải trọng tác dụng  $\{F_{n+1}^a(t_{n+1})\}$  ở thời gian  $t_{n+1}$

Chuyển vị và vận tốc trong giải thuật Newmark sẽ được tính như sau [6]:

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + [(1-\delta)\{\dot{u}_n\} + \delta\{\dot{u}_{n+1}\}]\Delta t \quad (3)$$

$$\{u_{n+1}\} = \{u_n\}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2}-\alpha\right)\{\ddot{u}_n\} + \alpha\{\ddot{u}_{n+1}\}\right]\Delta t^2 \quad (4)$$

Trong đó  $\alpha, \delta$  là các hệ số của Newmark,  $\{u_n\}$ ,  $\{\dot{u}_n\}$ ,  $\{\ddot{u}_n\}$  lần lượt là chuyển vị, vận tốc và gia tốc nút tại mốc thời gian  $t_n$ ,  $\{u_{n+1}\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\}$ ,  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$  lần lượt là chuyển vị, vận tốc và gia tốc nút tại mốc thời gian  $t_{n+1}$ . Sơ đồ tích phân Newmark tồn tại ba ẩn số chưa biết là  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$ ,  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  và  $\{u_{n+1}\}$ . Các ẩn này có thể tính thông qua ba ẩn đã biết  $\{\ddot{u}_n\}$ ,  $\{\dot{u}_n\}$ ,  $\{u_n\}$  bằng cách kết hợp các phương trình (2) và (3), ẩn  $\{u_{n+1}\}$  tính được thông qua phương trình:

$$\begin{aligned} & (a_0[M] + a_1[C] + [K])\{u_{n+1}\} = \\ & = \{F^a\} + [M](a_0\{u_n\} + a_2\{\dot{u}_n\} + a_3\{\ddot{u}_n\}) + \\ & + [C](a_1\{u_n\} + a_4\{\dot{u}_n\} + a_5\{\ddot{u}_n\}) \end{aligned} \quad (5)$$

Trong đó:

$$a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}, \quad a_1 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}, \quad a_2 = \frac{1}{\alpha\Delta t}, \quad a_3 = \frac{1}{2\alpha} - 1$$

$$a_4 = \frac{\delta}{\alpha} - 1, \quad a_5 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right), \quad a_6 = \Delta t(1 - \delta), \quad a_7 = \delta\Delta t$$

Sau khi ẩn  $\{u_{n+1}\}$  tính được thông qua phương trình (4). Các đại lượng  $\{\dot{u}_{n+1}\}$  và  $\{\ddot{u}_{n+1}\}$  được tính theo:

$$\{\ddot{u}_{n+1}\} = a_0(\{u_{n+1}\} - \{u_n\}) - a_2\{\dot{u}_n\} - a_3 \quad (6)$$

$$\{\dot{u}_{n+1}\} = \{\dot{u}_n\} + a_6\{\ddot{u}_n\} + a_7\{\ddot{u}_{n+1}\} \quad (7)$$

Sự hiệu quả của phương pháp Newmark được đánh giá thông qua tính ổn định và độ nhiễu. Tính ổn định ảnh hưởng bởi bước thời gian  $\Delta t$ , giá trị  $\Delta t$  phải đủ nhỏ để ghi lại được phản ứng kết cấu và  $\Delta t$  được lấy bằng  $1/20f$  với  $f$  là tần số đáp ứng. Độ nhiễu do giải thuật số trong phương pháp Newmark điều khiển thông qua biến số  $\delta$ :

$$\alpha = \frac{1}{4}(1 + \gamma)^2 \quad \text{và} \quad \delta = \frac{1}{2} + \gamma \quad (\text{với } \gamma \geq 0) \quad (8)$$

Giá trị  $\gamma$  được Newmark đề xuất  $\gamma = 0.1$  với PPTPTT và  $\gamma = 0.005$  với PPCCHD [6].

### 2.2. Độ cản

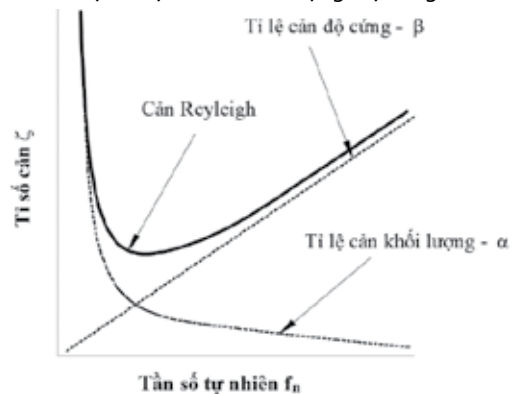
Độ cản là đại lượng thể hiện sự tắt dần của dao động kết cấu, do đó độ cản có ảnh hưởng khi kết cấu chịu tải trọng động nên được đề cập đến trong bài nghiên cứu. Mỗi mode dao động của kết cấu có các tỷ số cản khác nhau, do PPTPTT không đi tìm mode dao động nên để duy trì tỷ số cản trong một phạm vi tần số, một lý thuyết cản được sử dụng là cản Reyleigh do đây là lý thuyết cản được sử dụng trong phần mềm mô phỏng. Cản Reyleigh được viết lại dưới dạng [7] và vẽ lại như Hình 2:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (9)$$

Trong đó:

$[M]$ ,  $[K]$ : Lần lượt là ma trận khối lượng và ma trận độ cứng

$\alpha, \beta$ : Lần lượt là hệ số cản khối lượng, độ cứng



**Hình 2.** Quan hệ tần số - tỷ số cản trong lý thuyết cản Reyleigh

Trong công thức cản Reyleigh, khối lượng sẽ ảnh hưởng lớn đến hiệu quả cản ở tần số thấp hơn và độ cứng sẽ ảnh hưởng đối với tần số cao hơn. Vì thế  $\alpha$  và  $\beta$  là hai thuộc tính đại diện cho tần số thấp hơn và tần số cao hơn.

Tỉ số cản  $\xi_i$  ở mỗi tần số  $f_i$  là khác nhau, do đó hai giá trị  $\alpha$  và  $\beta$  cũng thay đổi. Giả sử, trong khoảng từ tần số  $f_i \rightarrow f_j$  (ứng với tần số vòng  $\omega_i \rightarrow \omega_j$ ) sẽ có tỉ số cản tương ứng  $\xi_i \rightarrow \xi_j$ ,  $\alpha$  và  $\beta$  sẽ được tính như sau:

$$\begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{pmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -\frac{1}{\omega_j} & \frac{1}{\omega_i} \end{pmatrix} \begin{cases} \xi_i \\ \xi_j \end{cases} \quad (10)$$

Tuy nhiên, để đơn giản có thể coi tỉ số cản gần như là hằng số  $\xi_i = \xi_j = \xi$  trên một phạm vi tần số  $f_i \rightarrow f_j$ . Lúc này phương trình trên trở thành

$$\begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \begin{cases} \omega_i\omega_j \\ 1 \end{cases} \quad (11)$$

2.3. Phương pháp số trong bài toán chất lỏng của TLD

Phương pháp thể tích hữu hạn (Finite Volume Method - FVM) là phương pháp số dùng để giải các bài toán cơ lưu chất bằng cách rời rạc các khối thể tích (cell), các khối thể tích này liên kết với nhau bằng các mặt tiếp xúc ở các nút. Mỗi "cell" đều phải thỏa mãn phương trình chủ đạo Navier-Stoke đặc trưng cho dòng chảy như sau:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \left[ \mu(\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v}^T) \right] + \mathbf{F} \quad (13)$$

Trong đó  $\mathbf{v}$  là trường vận tốc;  $\rho$  và  $\mu$  lần lượt là khối lượng riêng và độ nhớt,  $p$  là áp suất còn  $\mathbf{F}$  là lực khối. Do TLD là hệ chất lưu gồm hai pha: Pha nước (Water) và pha khí (Air), để giải các phương trình (12) và (13) cần giải các phương trình con và xây dựng mô hình đa pha như bên dưới.

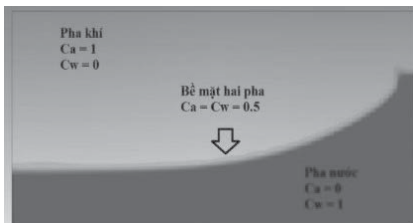
2.3.1. Mô hình đa pha Eulerian - Eulerian

Mô hình đa pha (Multiphase) được sử dụng để mô phỏng miền chất lưu. Trong mô hình đa pha Eulerian - Eulerian, có hai dạng là không đồng chất (inhomogeneous) và đồng chất (homogeneous). Mô hình không đồng chất cho phép hai pha truyền động lượng, nhiệt và khối lượng trực tiếp thông qua bề mặt tiếp xúc của chất lưu. Các pha sẽ trượt với nhau và có các trường đặc tính khác nhau. Mô hình đồng chất là một trường hợp đặc biệt, ở mô hình này các chất lưu sử dụng chung một trường thông lượng như là nhiệt độ và sự chảy rối. Các pha sẽ không trượt với nhau do đó đây là mô hình phù hợp để mô phỏng trong bài nghiên cứu.

Mỗi pha trong đa pha sẽ được đặc trưng bởi phương trình tỷ số thể tích  $C$ . Phương trình của hệ số  $C$  sẽ cùng dạng với phương trình bảo toàn khối lượng như sau:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = 0 \quad (14)$$

$C$  có giá trị là "1" khi phần tử chất lỏng là đầy, triệt tiêu bằng "0" khi phần tử rỗng và có giá trị trung bình "0.5" khi phần tử nằm trên bề mặt giữa hai pha (Hình 3).



Hình 3. Pha nước và pha khí trong TLD

Các đặc trưng vật lý của khối lượng riêng trộn lẫn 2 pha là  $\rho$  và độ nhớt  $\mu$  được mô tả như hàm số của đặc trưng pha và hệ số tỷ lệ thể tích  $C$ , đặc trưng bởi tỷ số của thể tích chất lỏng trên tổng thể tích phần tử chất lỏng trong phần tử tính toán:

$$\rho = C\rho_W + (1-C)\rho_A \quad (15)$$

$$\mu = C\mu_W + (1-C)\mu_A \quad (16)$$

Trong đó,  $W$  và  $A$  đại diện cho pha nước và pha khí. Ngoài ra, để giải được phương trình chủ đạo (13) cần thêm các phương trình điều kiện biên đặc trưng cho chất lưu gồm có phương trình liên tục, phương trình động lượng và phương trình năng lượng.

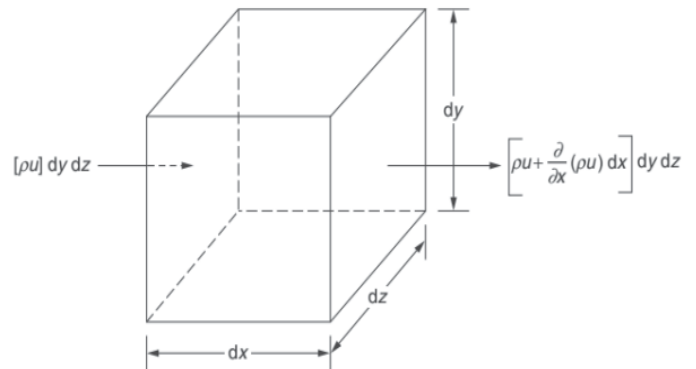
2.3.2. Các phương trình động lực học chất lưu

Mọi miền chất lưu đều được mô tả thông qua phương trình liên tục, phương trình động lượng và phương trình năng lượng [8].

a. Phương trình liên tục

Phương trình liên tục được mô tả bởi các khối thể tích vi phân có kích thước  $(dxdydz)$  như Hình 4. Theo định luật bảo toàn khối lượng, tổng khối lượng theo ba trục  $x, y, z$  phải bằng với định

mức thời gian thay đổi khối lượng  $\frac{\partial}{\partial t}(\rho dxdydz)$



Hình 4. Khối thể tích vi phân

Xét khối thể tích vi phân độc lập với thời gian, phương trình liên tục sẽ như sau

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (17)$$

Trong đó,  $\rho$  là khối lượng riêng,  $t$  là thời gian,  $u, v$  và  $w$  lần lượt là vận tốc theo trục  $x, y$  và  $z$ . Bằng cách sử dụng vector đại diện, các đại lượng  $u, v$  và  $w$  được viết lại theo vector vận tốc và vector gradient như sau:

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad \text{và} \quad \vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k} \quad (18)$$

Từ (18), phương trình (17) được viết lại thành:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (19)$$

Hai phương trình (17) và (19) đại diện cho dòng chất lưu trong không gian ba chiều ở trạng thái không ổn định. Nếu chất lưu không nén được, độ giãn nở thể tích của phần tử chất lưu theo thời gian là zero, lúc này phương trình liên tục cho cả trạng thái ổn định và không ổn như là:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

b. Phương trình động lượng

Phương trình động lượng cho chất lưu được thiết lập dựa trên định luật II Newton cho khối thể tích vi phân  $(dxdydz)$  có khối

lượng cố định  $m$ . Giả sử, chất lưu bị tác động bởi ngoại lực trên một đơn vị khối lượng được biểu diễn bởi vector như sau:

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} \quad (21)$$

Áp dụng định luật II Newton theo trục  $x$ , ta có:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{F} = m \vec{a} \quad (22)$$

Với  $\vec{\nabla} \cdot \vec{F}$  và  $\vec{a}$  lần lượt là gradient của lực và gia tốc. Chia toàn bộ phương trình (23) cho một phần tử thể tích thì được phương trình:

$$\rho \vec{B} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma} = \rho \vec{a} \quad (23)$$

Các phương trình trên ứng với các chất lưu chịu tác dụng của lực hấp dẫn. Đối với chất lưu Newton chỉ có một hệ số nhớt động học, các phương trình trên có thể thu gọn thành:

$$\rho \vec{a} = \rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} \right) = \rho \vec{B} - \vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) \quad (24)$$

Trong phương trình trên,  $\rho \vec{a}$  gọi là lực quán tính bản thân chất lưu,  $\rho \vec{B}$  là lực khối,  $\vec{\nabla} P$  là áp lực và  $\mu \vec{\nabla}^2 \vec{V} + \frac{\mu}{3} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V})$  là lực nhớt. Đây gọi là phương trình Navier - Stokes cho chất lưu Newton nén được, đối với chất lưu không nén được ( $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$ ), phương trình Navier - Stoke được viết như sau:

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} = \vec{B} - \frac{\vec{\nabla} P}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \vec{\nabla}^2 \vec{V} \quad (25)$$

**c. Phương trình năng lượng**

Phương trình năng lượng chỉ ảnh hưởng đến sự truyền nhiệt của các chất lưu, do đó bài nghiên cứu bỏ qua sự ảnh hưởng của nhiệt đối với chất lưu.

**2.3.3. Mặt thoáng**

Mặt thoáng là bề mặt chất giữa hai chất lưu được ràng buộc bởi hai điều kiện: Điều kiện động học (Kinematic) liên quan đến sự chuyển động của bề mặt và điều kiện động lực học (Dynamic) liên quan đến sự cân bằng lực ở mặt thoáng

**a. Điều kiện động học (Kinematic condition)**

Do chất lưu không xuyên qua được mặt thoáng nên vận tốc thành phần của chất lưu tại mặt thoáng bằng với vận tốc mặt thoáng được mô tả thông qua phương trình sau:

$$\left[ (v - v_b) \cdot n \right]_{fs} = 0 \quad (26)$$

**b. Điều kiện động lực học (Dynamic condition)**

Lực tác dụng lên chất lưu tại mặt thoáng được cân bằng nên moment động lượng được bảo toàn, đại lượng đặc trưng cho điều kiện động lực học là ứng suất căng bề mặt giữa hai pha. Tuy nhiên, do để dễ dàng đạt sự hội tụ và tiết kiệm thời gian cho bài toán, bài nghiên cứu bỏ qua ứng suất căng bề mặt giữa nước và không khí.

**2.3.4. Mô hình chảy rối**

Chảy rối là sự biến thiên trường dòng chảy trong khoảng thời gian và khoảng cách. Sự chảy rối có ảnh hưởng không nhỏ đối với đặc tính dòng chảy và được mô tả theo [8], trong đó dòng chảy rối xuất hiện khi lực quán tính trong chất lưu trở nên đáng kể khi so với lực nhớt động học và nó được định nghĩa bởi số Reynolds. Một số phương pháp để mô phỏng sự chảy rối là RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes), LES (large eddy simulation) và DES (detached-eddy simulation). Bài nghiên cứu chỉ sử dụng RANS.

Đối với chất lưu thay đổi theo thời gian, phương trình RANS được mô tả như sau [9, 10]:

$$V = \bar{V} + V' \quad (27)$$

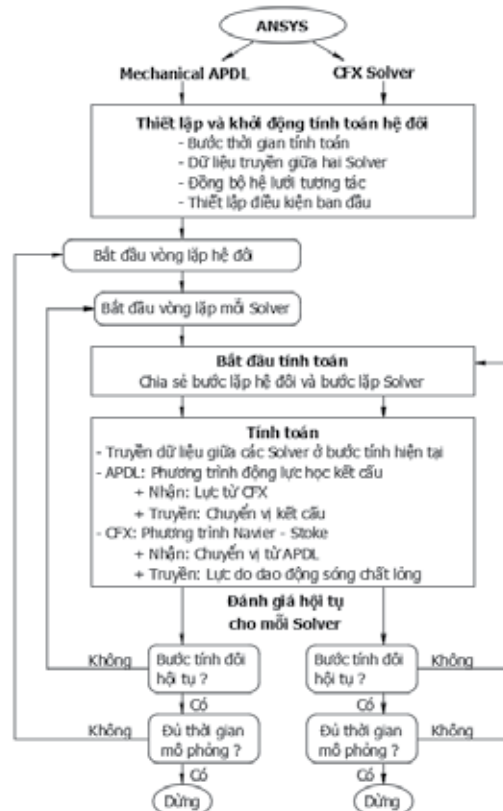
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{V}_i) = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{V}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{V}_j \bar{V}_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} - \rho \bar{V}_j V'_i) + S_M \quad (29)$$

Trong đó  $V_i$  lần lượt là vận tốc thành phần,  $\sigma$  là ứng suất căng bề mặt,  $p$  là áp suất và  $S_M$  là động lượng ban đầu. Một trong những mô hình chảy rối RANS có thể kể đến như  $k-\omega$ ,  $SST$ ,  $k-\varepsilon, \dots$  trong đó mô hình  $k-\varepsilon$  được sử dụng rộng rãi nhất do đó bài nghiên cứu sử dụng mô hình này. Đây là mô hình hai phương trình trong đó kể thêm hai phương trình vận chuyển để mô tả đặc tính dòng chảy. Mô hình  $k-\varepsilon$  rất hiệu quả trong việc mô phỏng lớp dòng chảy không ma sát cắt và chênh lệch áp suất nhỏ.

**3. MÔ PHỎNG HỆ KẾT CẤU CÓ TLD BẰNG ANSYS**

Phần mềm Ansys được sử dụng với công cụ Mechanical ADPL để tính toán kết cấu và CFX để mô phỏng miền chất lỏng. Mô phỏng tương tác kết cấu - chất lỏng trong Ansys có hai dạng: (1) Tương tác một chiều (FSI 1-way) là kiểu tương tác mà sự dao động của chất lỏng là điều kiện biên ngoại lực tác động gây ra chuyển vị cho kết cấu. Những biến dạng, chuyển vị này không đủ lớn làm ảnh hưởng ngược trở lại cho miền chất lỏng. Trong kiểu tương tác này, miền chất lỏng sẽ truyền lực lên kết cấu. (2) Tương tác hai chiều (FSI 2-way) là kiểu tương tác một chiều có thêm ảnh hưởng của dao động kết cấu lên miền chất lỏng. Trong kiểu tương tác này, miền chất lỏng sẽ truyền lực lên kết cấu, kết cấu nhận lực và dao động gây ra chuyển vị truyền ngược vào miền chất lỏng. Đây là cách mô phỏng TLD hoạt động và được sử dụng trong bài nghiên cứu.



Hình 5. Sơ đồ giải thuật FSI trong Ansys

**4. VÍ DỤ TÍNH TOÁN**

Để đánh giá hiệu quả kháng chấn của MTLĐ, khung thép và hệ bể chứa chất lỏng MTLĐ được chế tạo tại Trường Đại học SPKT TP.HCM. Hệ khung thép - bể được gắn với động cơ trực khuỷu cho phép tịnh tiến khung để giả lập tải trọng động.

**4.1. Phân tích đại lượng đặc trưng kết cấu khung - bể**

Khung thép như Hình 6 với các đặc trưng mô tả ở Bảng 1 và Bảng 2 được dùng để mô phỏng số và phân tích thực nghiệm.

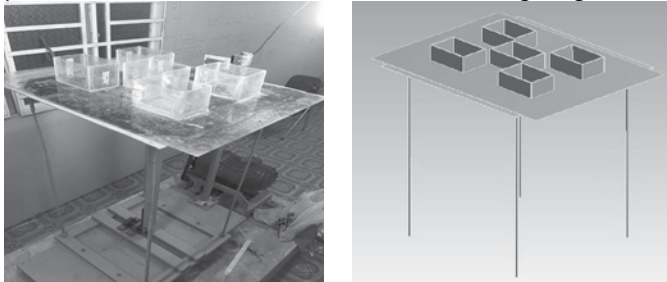
Bảng 1. Đặc trưng hình học

STT	Mô hình	Kích thước	Khối lượng
1	Cột thép	Cao 1.1m - Bước cột 0.52m - Đường kính 10mm	2.7 kg
2	Sàn thép	0.65m x 0.65m - Dày 5mm	16.6 kg
3	Hệ bể mica	5 bể - 0.1m x 0.15m x 0.1m	3 kg
4	Tổng khối lượng = 22.3 kg		

Bảng 2. Đặc trưng vật lý

STT	Vật liệu	Khối lượng riêng	Module đàn hồi	Hệ số poisson
1	Thép	7850 kg/m <sup>3</sup>	210 GPa	0.3
2	Mica (Acrylic)	1000 kg/m <sup>3</sup>	2.7 GPa	0.27

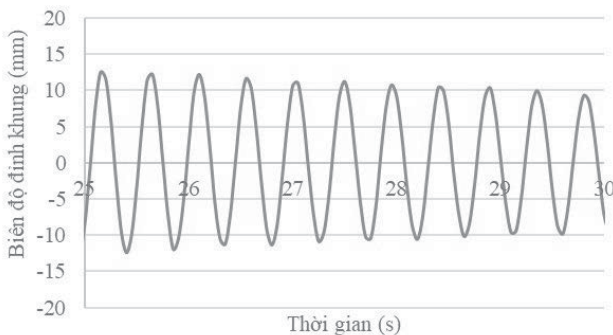
Khung thép khi có mang hệ bể chứa chất lỏng như thiết bị giảm chấn như Hình 6. Chi tiết thiết kế ở phần 4.2 hoặc phương pháp thiết kế có thể xem thêm ở các bài báo của cùng tác giả.



Hình 6. Hệ khung - bể trong thực tế và mô phỏng

Để xác định được tỷ số cản để tính toán hệ số  $\alpha$  và  $\beta$  khi mô phỏng nhằm giải quyết (9), hệ khung và bể được kéo khỏi vị trí cân bằng và thả cho dao động tự do với biên độ ban đầu 4 cm. Đáp ứng dao động của khung theo thời gian được đo lại bằng thiết bị bàn lắc, chi tiết thể hiện ở Hình 7.

Dao động khung - bể tắt dần



Hình 7. Thí nghiệm xác định tần số và tỷ số cản

Xét tại thời điểm  $\begin{cases} t_1 = 25.2(s) \rightarrow A_1 = 11.62(mm) \\ t_2 = 29.85(s) \rightarrow A_2 = 8.5(mm) \end{cases}$  số chu kỳ thực hiện  $m=10$

$$\delta_{tb} = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) = \frac{1}{10} \times \ln\left(\frac{11.62}{8.5}\right) = 0.0313$$

$$\rightarrow \xi_{tb} = \frac{\delta_{tb}}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_{tb}^2}} = \frac{0.0313}{\sqrt{(2\pi)^2 + 0.0313^2}} \approx 0.005 = 0.5\%$$

Chu kỳ và tần số dao động có tỉ số cản 0.5% :

$$T_d = \frac{t_2 - t_1}{m} = \frac{29.85 - 25.2}{10} = 0.465(s) \rightarrow f_d = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{0.465} = 2.15(Hz)$$

Vậy tần số riêng của khung thực nghiệm

$$f = \frac{f_d}{\sqrt{1 - \xi_{tb}^2}} = \frac{2.15}{\sqrt{1 - 0.005^2}} = 2.15(Hz)$$

Bảng 3. Đặc trưng tần số và độ cản

Mode	Ansys	Thực nghiệm	Độ cản $\xi_{tb} = 0.005$
1	2.0747	2.15	$\alpha = 0.0651912$ $\beta = 0.00038349$
2	2.0755		
3	3.6422		

**4.2. Thiết kế MTLĐ**

Tải trọng động kích thích hệ ngay tại tần số riêng chưa hẳn gây ra công hưởng mà dải tần số này có phạm vi từ  $0.95f_n \rightarrow 1.05f_n$ .

Cụ thể, thiết bị đo của bàn lắc ghi nhận tại tần số  $f = 2.08(Hz)$  làm hệ khung bể dao động cực đại nhất. Do đó, đây cũng là tần số kích thích tải điều hòa cho khung - bể cũng như là tần số thiết kế MTLĐ. Việc thiết kế hệ bể chứa đa tần có thể tìm hiểu thêm tại các nghiên cứu trước đây của tác giả [11].



Hình 8. Sơ đồ quy trình thiết kế TLD

Từ đó có được kết quả thiết kế 5-TLD kích thước  $0.15 \times 0.1 \times 0.1(m^3)$  như ở Hình 6. Chi tiết lượng chất lỏng để hệ MTLĐ làm việc như thiết bị đa tần được thể hiện ở Bảng 4.

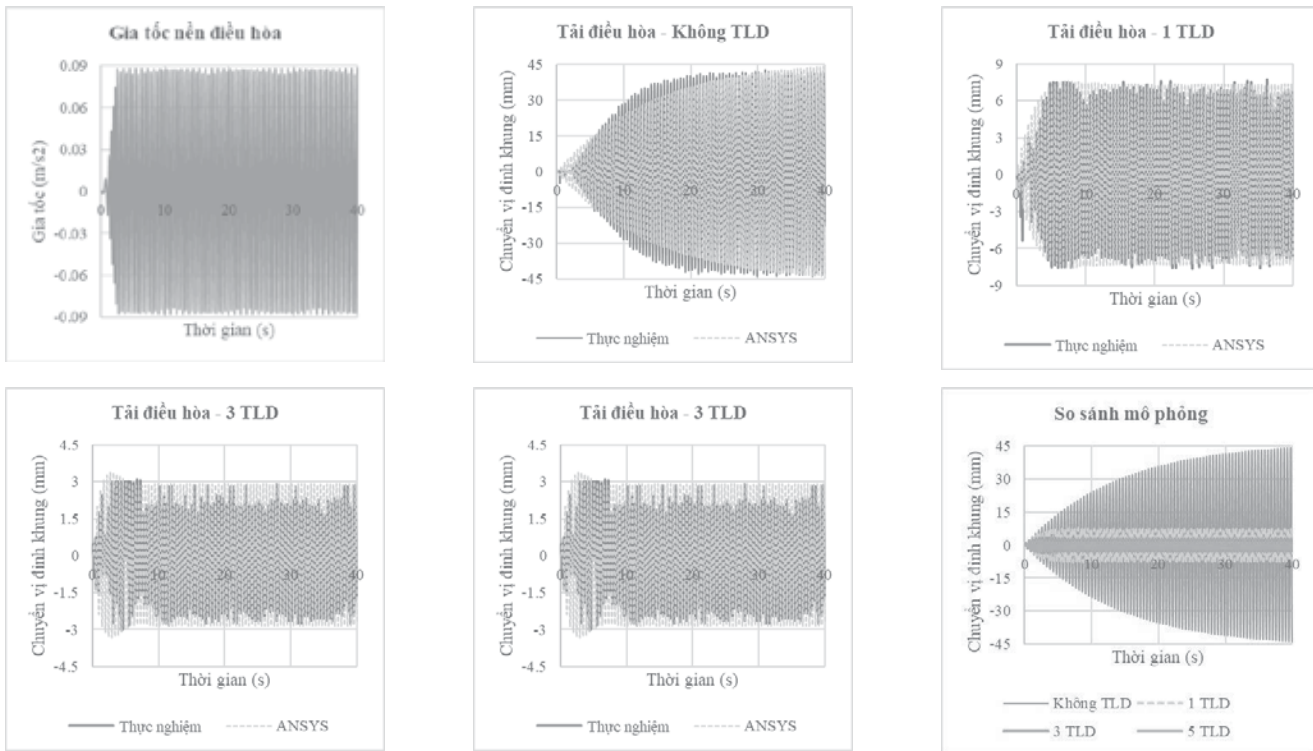
Bảng 4. Tóm tắt thiết kế 5TLD cho khung thép

STT	$m_{khung} + m_{bể}$ (kg)	MTLD (kg)	$f_{TLD}$ (Hz)	$h_{TLD}$ (mm)	Ghi chú
1	22.3	0.269	1.99829	18	
2		0.284	2.04231	19	
3		0.299	2.08398	20	Bể trung tâm
4		0.314	2.12345	21	
5		0.329	2.16083	22	

**4.3. So sánh kết quả số với thí nghiệm trên bàn lắc**

Sau khi tính toán thiết kế được thiết bị MTLĐ cho cơ hệ. Hệ khung+bể được kích thích tải điều hòa với biên độ bàn rung  $A = 0.5(mm)$  ở tần số thực nghiệm  $f_{thucnghiem} = 2.08(Hz)$  và mô phỏng  $f_{Ansys} = 2.07(Hz)$ . Kết quả tính toán được so sánh với thực nghiệm như ở bảng 5.

Bảng 5. Đối chiếu chuyển vị đỉnh khung giữa mô phỏng số với thực nghiệm



Ngoài ra để thấy được độ chính xác của mô phỏng số, hình ảnh dao động của sóng chất lỏng bên trong bể chứa tại thời điểm 3.0 s được thể hiện ở Hình 9.



Hình 9. Hình dạng sóng chất lỏng ở thời điểm khoảng 3.0s được kích tải điều hòa

**5. KẾT LUẬN**

Khả năng kháng chấn của TLD là rất tốt, đặc biệt khi số lượng TLD tăng lên thì hiệu quả của thiết bị càng tăng. Trong trường hợp này số lượng bể chứa 5TLD được xem như là tối ưu đối với khung 1.1m.

MTLD giúp giảm đến 85% (45 mm còn 2 mm) chuyển vị đỉnh trong trường hợp công trình chịu tải trọng dao động điều hoà.

Các tính toán được đối chiếu với thí nghiệm trên bàn lắc cho thấy sự chính xác của phương pháp số.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1] Y. Fujino, B. M. Pacheco, P. Chaiseri, and L. M. Sun, "Parametric studies on tuned liquid damper (TLD) using circular containers by free-oscillation experiments," *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1988, pp. 177-187, 1988.
- [2] T. T. Soong and B. F. Spencer, "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice," *Engineering Structures*, vol. 24, pp. 243-259, 2002/03/01/ 2002.
- [3] B. P. D. Tuong, P. D. Huynh, T.-T. Bui, and V. Sarhosis, "Numerical Analysis of the Dynamic Responses of Multistory Structures Equipped with Tuned Liquid Dampers Considering Fluid-Structure Interactions," *Open Construction and Building Technology Journal*, vol. 13, pp. 289-300, 2019.
- [4] P. T. Nguyen and T. D. Pham, "The effectiveness of improved tuned liquid column damper on the dynamic response of the structure under earthquake excitations," *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, vol. 6, pp. 27-34, 2019.
- [5] D. K. Quoc and N. T. Phuoc, "Solving dynamic equation using combination of both trigonometric and hyperbolic cosine functions for approximating acceleration," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 19, pp. 481-486, 2005/01/01 2005.
- [6] N. M. Newmark and E. Rosenblueth, *Fundamentals of earthquake engineering*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1971.
- [7] Z. Song and C. Su, "Computation of Rayleigh Damping Coefficients for the Seismic Analysis of a Hydro-Powerhouse," *Shock and Vibration*, vol. 2017, 2017.
- [8] T. Liaghat, F. Guibault, L. Allenbach, and B. Nennemann, "Two-Way Fluid-Structure Coupling in Vibration and Damping Analysis of an Oscillating Hydrofoil," in *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2014.
- [9] O. el Moctar, J. Ley, J. Oberhagemann, and T. Schellin, "Nonlinear computational methods for hydroelastic effects of ships in extreme seas," *Ocean Engineering*, vol. 130, pp. 659-673, 2017/01/15/ 2017.
- [10] S. H. Rhee, "Unstructured Grid Based Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method for Liquid Tank Sloshing," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 127, pp. 572-582, 2005.
- [11] B. P. D. Tuong and P. D. Huynh, "Numerical Study on Vibration Control of Structures Using Multi Tuned Liquid Dampers with High Mass Ratio," in *2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*, 2020, pp. 1-4.