

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลได้มีพัฒนาอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลก็ยังมีขีดข้อจำกัด การเกิดการสั่นสะเทือนที่ไม่เหมาะสมขึ้นกับส่วนประกอบของชิ้นงานในระบบ ก็เป็นอีกปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการอ่านและบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนเพื่อหาแนวทางในการแก้ปัญหา ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน การคำนวณอุปกรณ์การใช้งานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

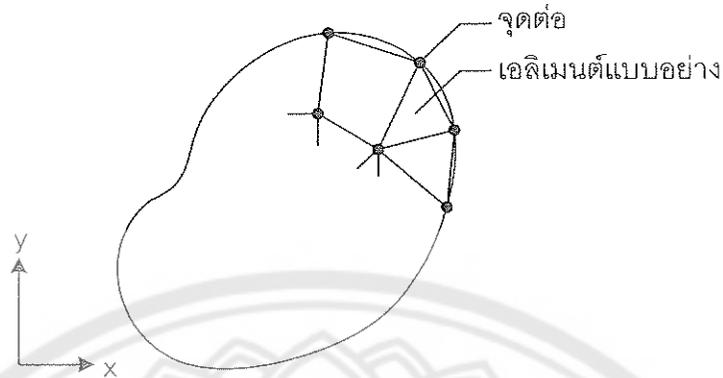
ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการหาค่าเฉลยเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในงานทางวิศวกรรมเนื่องจากเป็นวิธีการคำนวณที่ให้ความแม่นยำ รวดเร็ว และเป็นวิธีที่ประมวลผลการคำนวณที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพเกินกว่าจะคำนวณได้ด้วยมือ โดยอาศัยหลักการง่าย ๆ ของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์กล่าวคือ ทำการเติมรูปทรงของผลิตภัณฑ์ด้วยชิ้นส่วนเล็กๆ ที่มีรูปทรงเรขาคณิต เช่น สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ลูกบาศก์ เป็นต้น เนื่องจากสามารถคำนวณหาค่าตอบที่แท้จริงของชิ้นส่วนที่มีรูปทรงเรขาคณิตได้ ดังนั้นเมื่อเติมชิ้นส่วนเล็กๆ เหล่านี้ลงไปชิ้นส่วนใหญ่ก็สามารถศึกษาพฤติกรรมโดยรวมของระบบได้

1. ขั้นตอนทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

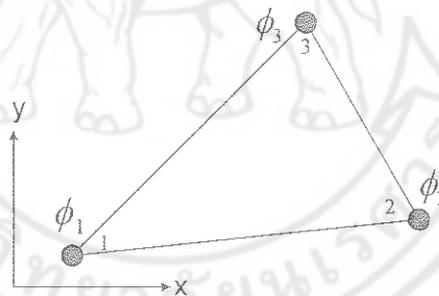
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ ทั้งหมด 6 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งขอบเขตรูปร่างลักษณะของปัญหาที่ต้องการจะหาค่าผลลัพธ์นั้น ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ดังแสดงในภาพ 1 ขอบเขตดังกล่าวอาจเป็นขอบเขตของปัญหานั้นๆ กัน เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาเกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (Thermal Problem) รวมทั้งปัญหาของการไหล (Fluid Problem)



ภาพ 1 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์แบบต่างๆ

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ (Element Interpolation Function) เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยม (เอลิเมนต์แบบอย่างดังแสดงในภาพ 1) เอลิเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วย 3 จุดต่อที่มีหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างประกอบด้วย 3 จุดต่อโดยมีตัวไม่ทราบค่าอยู่ ณ ตำแหน่งที่จุดต่อ

โดยที่จุดต่อนี้เป็นตำแหน่งของตัวไม่ทราบค่า (Nodal Unknowns) ซึ่งคือ ϕ_1 , ϕ_2 และ ϕ_3 ตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อเหล่านี้ อาจเป็นค่าการยืดหรือหดตัว (Displacement) หากทำปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง หรืออาจเป็นค่าอุณหภูมิหากทำปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน หรือไม่ก็อาจเป็นความเร็วของของไหลหากทำปัญหาเกี่ยวกับการไหล เป็นต้น ลักษณะการกระจายของตัวไม่ทราบค่าบนเอลิเมนต์นี้ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในและตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (2.1)$$

โดย $N_i(x, y), i = 1, 2, 3$ คือ ฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ จากสมการของ (2.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= [N_1, N_2, N_3] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\ &= [N] \{\phi\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

(1x3) (3x1)

โดย $[N]$ คือ เมตริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ และ $\{\phi\}$ คือ เวกเตอร์เมตริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อของเอลิเมนต์นั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ สัญลักษณ์ $[\]$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวอน (Row Matrix) และ $\{ \}$ แสดงถึงเมตริกซ์แถวตั้ง (Column Matrix)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์ (Element Equations) ดังตัวอย่างเช่น สมการของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบอย่างดังแสดงในภาพ 2 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}_e \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_e = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_e \quad (2.3)$$

ซึ่งเขียนย่อได้เป็น

$$[K]_e \{\phi\}_e = \{F\}_e \quad (2.4)$$

โดยขั้นตอนที่ 3 นี้ ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการ (2.3) สามารถทำได้โดยวิธีโดยตรง (Direct Approach) วิธีแปรผัน (Variation Approach) และวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of Weighted Residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ก่อให้เกิดระบบสมการพร้อมกันขึ้น (System of Simultaneous Equation) ในรูปแบบดังนี้

$$\Sigma \left(\text{Element Equation} \right) \Rightarrow [K]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}} \quad (2.5)$$

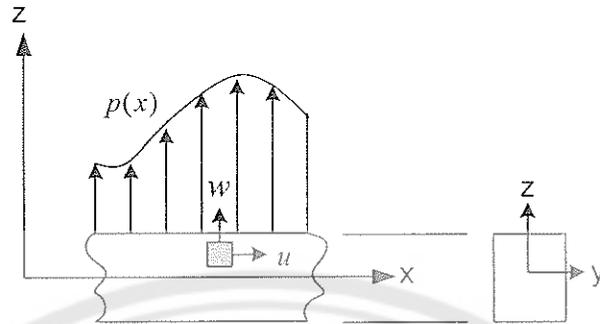
ขั้นตอนที่ 5 ทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ลงในสมการ (2.5) แล้วจึงแก้สมการนั้นเพื่อหา $\{\phi\}_{\text{sys}}$ อันประกอบด้วยตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อ (Nodal Unknowns) ซึ่งอาจจะเป็นค่าของการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้าง หรือค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ หากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อน หรืออาจเป็นค่าของความเร็วของของไหลหากเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อคำนวณค่าต่างๆ ที่จุดต่อออกมาได้แล้วก็สามารถทำการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น เมื่อทราบค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ณ ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างก็สามารถนำไปใช้ในการหาความเครียด (Strain) และความเค้น (Stress) ได้ต่อไป หรือเมื่อทราบความเร็วของของไหลก็สามารถคำนวณหาปริมาณอัตราการไหลทั้งหมดได้ เป็นต้น

2. วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาของแข็ง

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มพัฒนาจากการแก้ปัญหาทางด้านของแข็ง โดยการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากวิธีการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงภายนอกที่มากระทำ แต่ในปัจจุบันการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำความเข้าใจได้โดยง่ายและใช้กันมากในการสร้างโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างๆ ไปคือ การใช้วิธีการสมมุติลักษณะการกระจายของการเคลื่อนตัวของเอลิเมนต์ โดยจะมีลำดับขั้นตอนการแก้ปัญหาที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ใช้ในปัญหานั้นๆ โดยจะแสดงตัวอย่างในหัวข้อดังต่อไปนี้

2.1 ปัญหาการโก่งของคาน



ภาพ 3 การโก่งและยึดตัวของคานเมื่อถูกแรงมากระทำ

จากภาพ 3 แสดงส่วนหนึ่งของคานที่วางตัวอยู่ในแนวแกน x และมีพื้นที่หน้าตัดในระนาบ $y-z$ หากคานนี้ถูกแรงแบบกระจาย (Distributed Load) $p(x)$ มากระทำดังแสดงในภาพก่อให้เกิดการโก่งด้วยค่าเคลื่อนตัว w ในแนวแกน z และการยึดตัว u ในแนวแกน x

2.1.1 สมการพื้นฐาน

สมมติฐานพื้นฐานที่ใช้ในการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการโก่งของคานประกอบด้วย (1) แผ่นเรียบในแนวหน้าตัดของคาน ณ ตำแหน่งใดๆ ตลอดความยาวของคานยังคงมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบเช่นเดิมหลังจากที่คานได้เกิดการโก่งไปแล้ว สมมติฐานข้อแรกนี้ก่อให้เกิดความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัว u และ w ซึ่งก็คือ

$$u = -z \frac{dw}{dx} \quad (2.6)$$

และ (2) คานนี้ค่อนข้างเรียวยาว ยังผลให้ค่าเคลื่อนตัวเนื่องจากการโก่งของคาน w นั้น คงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดใดหน้าตัดหนึ่งของคานและเปลี่ยนไปตามแนวความยาวของคานเท่านั้น นั่นคือ

$$w = w(x) \quad (2.7)$$

สมมติฐานดังกล่าวก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับการโก่งของคานอันเนื่องมาจากแรงแบบกระจาย คือ

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 w}{dx^2} \right) - p(x) = 0 \quad (2.8)$$

โดย E แทนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำคานและ I แทนโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (Moment of Inertia of Area) จากสมการเชิงอนุพันธ์ (2.8) ดังกล่าว พร้อมเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ก็จะสามารถทำการหาผลลัพท์ลักษณะการโก่งได้ โดยง่ายหากเป็นคานเพียงท่อนเดียวที่ถูกแรงกระทำและมีเงื่อนไขขอบเขตแบบง่ายๆ แต่ในทางปฏิบัติที่จะประกอบด้วยคานจำนวนหลายๆ ท่อนวางตัวในแนวต่างกันภายใต้แรงกระทำที่แตกต่างกัน ซึ่งการหาผลลัพท์โดยวิธีการเดิมๆ จะเป็นการลำบากอย่างมาก

2.1.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

จากสมการเชิงอนุพันธ์ (2.8) และใช้วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างเพื่อประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาการโก่งของคาน หรืออาจใช้วิธีการแปรผัน โดยถ้าหากใช้วิธีการแปรผัน จำเป็นต้องหาพลังงานศักย์รวมซึ่งศักย์ที่เกิดขึ้นจากประกอบด้วยพลังงานความเครียดในวัตถุ U^* และที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอก V^* ในที่นี้

$$U^* = \frac{1}{2} \int_V \sigma_x \varepsilon_x dV$$

เมื่อแทน $\sigma_x = E\varepsilon_x$ โดย $\varepsilon_x = \frac{du}{dx} = -z \frac{d^2 w}{dx^2}$ จากสมการ (2.6) ดังนั้น

$$U^* = \frac{1}{2} \int_V E z^2 \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dV$$

หากคานนั้นยาวเท่ากับ L และมีพื้นที่หน้าตัด A จะได้

$$U^* = \frac{1}{2} \int_0^L \left[\int_A E z^2 \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dA \right] dx$$

จากนั้น หากใช้สมมุติฐานสมการ (2.7) พลังงานศักย์นี้จะกลายมาเป็น

$$U^* = \frac{1}{2} \int_0^L E \underbrace{\left[\int_A z^2 dA \right]}_I \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx$$

หรือ

$$U^* = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx \quad (2.9a)$$

โดย I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกน y ตัวอย่างเช่น หากคานามีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง b และสูง h ในทิศแกน y และ z ตามลำดับ จะได้ $I = bh^3/12$ เป็นต้น

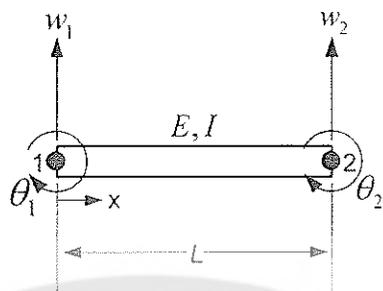
ส่วนพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงภายนอกคือ

$$V^* = -Work = - \int_0^L p(x)w(x)dx \quad (2.9b)$$

ดังนั้น พลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นทั้งหมดคือ

$$J = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx - \int_0^L p(x)w(x)dx \quad (2.10)$$

ก่อนที่จะสามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องสมมุติลักษณะการกระจายของค่าเคลื่อนตัว w จากการโก่งของคานาก่อน ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ถูกต้อง (Converged Solution) หลังจากแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดเล็กย่อยลงไปต่อเมื่อเลือกใช้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณบนเอลิเมนต์นั้นได้โดยถูกต้อง เนื่องจากพลังงานศักย์โดยรวมดังแสดงในสมการ (2.10) นั้นประกอบด้วยพจน์ที่เป็นอนุพันธ์อันดับสองของค่าเคลื่อนตัว w จากการโก่งของคานา ดังนั้นทั้งค่าเคลื่อนตัวและความชันของการเคลื่อนตัวจึงต้องถูกสมมุติให้มีความต่อเนื่องระหว่างเอลิเมนต์ ผลที่ได้จึงลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ถูกต้องหากใช้จำนวนเอลิเมนต์เพิ่มมากขึ้น ดังภาพ 4 แสดงเอลิเมนต์ของคานา (Beam Element) ที่ทำด้วยวัสดุที่มีโมดูลัสของความยืดหยุ่น E มีค่าโมเมนต์โดยแต่ละจุดต่อมีตัวที่ไม่ทราบค่าคือ การเคลื่อนตัว w และความชัน θ ตามลำดับ



ภาพ 4 เอลิเมนต์ของคาน

เนื่องจากเอลิเมนต์คานประกอบด้วยตัวแปรค่า 4 ค่า ดังนั้น จึงสมมุติ
ลักษณะการกระจายของค่าเคลื่อนตัว w จากการโค้งของคานดังนี้

$$w(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 x^3 \quad (2.11)$$

โดย $\alpha_i, i=1,2,3,4$ เป็นค่าคงตัวหาได้จากเงื่อนไขที่จุดต่อ คือ

$$w(x=0) = w_1 \quad w(x=L) = w_2 \quad (2.12)$$

$$-\frac{dw}{dx}(x=0) = \theta_1 \quad -\frac{dw}{dx}(x=L) = \theta_2 \quad (2.13)$$

จากนั้นจึงสามารถเขียนลักษณะการกระจายของค่าเคลื่อนตัว w ให้อยู่
ในรูปแบบของตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$w(x) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ \theta_1 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \end{Bmatrix} \quad (2.14)$$

$\begin{matrix} (1 \times 4) & (4 \times 1) \end{matrix}$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 N_1 &= 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 & N_3 &= \left(\frac{x}{L}\right)^2 \left(3 - 2\frac{x}{L}\right) \\
 N_2 &= -x\left(\frac{x}{L} - 1\right)^2 & N_4 &= -\frac{x^2}{L}\left(\frac{x}{L} - 1\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์คานสามารถสร้างขึ้นได้โดยง่าย โดยเริ่มจากสมการพลังงานศักย์รวม (2.10) ที่สามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$J = \frac{1}{2} \int_0^L \left(\frac{d^2 w}{dx^2}\right) EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2}\right) dx - \int_0^L p(x) w(x) dx$$

แต่จากการสมมุติลักษณะการกระจายของค่าเคลื่อนตัวในสมการ (2.14)

$$w(x) = \underbrace{[N]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\{\delta\}}_{(4 \times 1)} = \underbrace{[\delta]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\{N\}}_{(4 \times 1)}$$

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \underbrace{\left[\frac{d^2 N}{dx^2} \right]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\{\delta\}}_{(4 \times 1)} = \underbrace{[\delta]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\left\{ \frac{d^2 N}{dx^2} \right\}}_{(4 \times 1)}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{2} \int_0^L \underbrace{[\delta]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\left\{ \frac{d^2 N}{dx^2} \right\}}_{(4 \times 1)} EI \underbrace{\left[\frac{d^2 N}{dx^2} \right]}_{(4 \times 1)} \underbrace{\{\delta\}}_{(4 \times 1)} dx - \int_0^L p(x) w(x) dx \\
 &= \frac{1}{2} \underbrace{[\delta]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\int_0^L \left\{ \frac{d^2 N}{dx^2} \right\} EI \left[\frac{d^2 N}{dx^2} \right] dx}_{[K]} \underbrace{\{\delta\}}_{(4 \times 1)} - \underbrace{[\delta]}_{(1 \times 4)} \underbrace{\int_0^L p(x) \{N\} dx}_{\{F\}}
 \end{aligned}$$

$$J = \frac{1}{2} [\delta] [K] \{\delta\} - [\delta] \{F\}$$

จากนั้นสามารถทำการหาค่าต่ำสุด นั่นคือ

$$\frac{\partial J}{\partial \{\delta\}} = 0$$

ซึ่งก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของเอลิเมนต์คานนี้ ดังนี้

$$\underset{(4 \times 4)}{[K]} \underset{(4 \times 1)}{\{\delta\}} = \underset{4 \times 1}{\{F\}} \quad (2.16)$$

โดยเอลิเมนต์เมตริกซ์ของความแข็งเกร็ง คือ

$$[K] = \int_0^L \left\{ \frac{d^2 N}{dx^2} \right\} EI \left[\frac{d^2 N}{dx^2} \right] dx \quad (2.17)$$

ซึ่งเมื่อแทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ N , จากสมการ (2.15) แล้วทำการอินทิเกรตจะได้

$$[K] = \frac{2EI}{L^3} \begin{bmatrix} 6 & -3L & -6 & -3L \\ & 2L^2 & 3L & L^2 \\ & & 6 & 3L \\ & & & 2L^2 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

และโหลดเวกเตอร์จากแรงภายนอกแบบกระจาย

$$\{F\} = \int_0^L p(x) \{N\} dx \quad (2.19)$$

ซึ่งหาก $p(x)$ คงที่ตลอดความยาวของเอลิเมนต์เช่น เท่ากับ p_0 จะได้

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} p_0 L / 2 \\ -p_0 L^2 / 12 \\ p_0 L / 2 \\ p_0 L^2 / 12 \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

ทฤษฎีเกี่ยวกับการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม [8]

การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบๆ จุดสมดุลในช่วงเวลาหนึ่งของการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะการเคลื่อนที่รอบจุดสมดุลนั้นจะเกิดขึ้นในแบบซ้ำตัวเองหรือไม่ก็ตามจะเรียกการเคลื่อนที่นั้นว่า การสั่นสะเทือน (Vibration) หรือการแกว่ง (Oscillation) ตัวอย่างเช่น การแกว่งตัวของลูกตุ้มนาฬิกา การโยกตัวของเสาสูง หรือการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดอยู่บนสปริง เป็นต้น การศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมจึงเป็นการศึกษาเพื่อให้มีความเข้าใจถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง หรือของเครื่องจักรว่ามีคุณลักษณะเฉพาะเป็นอย่างไร รวมถึงการวัดการควบคุมการสั่นสะเทือนที่อาจเกิดขึ้นในชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้าง

1. ขั้นตอนการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม

สำหรับการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรม ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนของระบบที่ติดอยู่ภายใต้แรงกระทำหรือการสั่นสะเทือนโดยอิสระก็ตาม จะต้องมีการรับกวนระบบซึ่งเป็นค่าอินพุต (Input) ที่ให้กับระบบและจะมีการตอบสนอง (Response) เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งปริมาณทั้งสองนี้จะเป็นปริมาณที่ขึ้นกับเวลา สำหรับการตอบสนองของระบบที่เกิดการสั่นสะเทือนจะขึ้นอยู่กับสภาพเริ่มต้นของการสั่นสะเทือนและค่าที่ให้กับระบบ โดยทั่วไปแล้วระบบที่เกิดการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมมักจะเป็นระบบที่ยุ่งยากและมักจะไม่สามารถพิจารณาองค์ประกอบของการสั่นสะเทือนทั้งหมดด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ได้ แต่อาจจะหาคำตอบในบางลักษณะของการสั่นสะเทือนหรือในบางลักษณะของสภาพการเริ่มต้นของการสั่นสะเทือนได้ รวมถึงอาจจะหาค่าที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนเพียงบางค่าเท่านั้นไม่ใช่ค่าทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนของระบบ ในการศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมนี้มักจะเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) ซึ่งขั้นตอนการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองคณิตศาสตร์นั้น ได้จำลองระบบทางกลหรือโครงสร้างการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมโดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 การสร้างแบบจำลองทางกายภาพ

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างสมมุติฐานเบื้องต้นของระบบการสั่นสะเทือน โดยจะแทนสิ่งที่มีจริงด้วยแบบจำลองทางกายภาพ เช่น แทนแหล่งสะสมพลังงานศักย์ทุกแบบในระบบด้วยสปริง แทนสิ่งต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานด้วยตัวหน่วง เป็นต้น แบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้ควรจะสามารถแทนทุกส่วนของระบบจริงให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้สมการคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถแทนการสั่นสะเทือนของระบบได้อย่างถูกต้องการกำหนดระบบด้วยแบบจำลองทางธรรมชาติถือว่าเป็นสิ่งสำคัญและขึ้นอยู่กับดุลพินิจหรือข้อจำกัดของการออกแบบว่าจะจำลองระบบด้วยแบบจำลองที่มีความแม่นยำเพียงใด การจำลองแบบจำลองของวัตถุอันหนึ่งอาจ

จะพิจารณาจำลองวัตถุนั้นเป็นมวลลักษณะเป็นจุดหรืออาจจะจำลองเป็นวัตถุแข็งเกร็งก็ได้ แต่ความถูกต้องของแบบจำลองก็ขึ้นอยู่กับสภาพการเคลื่อนที่จริงว่า วัตถุนั้นมีการเคลื่อนที่อย่างไร อาจจะจำลองระบบว่าเป็นระบบเชิงเส้นหรือระบบไม่เป็นเชิงเส้นก็ได้ แต่ในท้ายที่สุดความถูกต้องจะขึ้นอยู่กับว่าผลที่ได้สอดคล้องกับความเป็นจริงมากน้อยเพียงใดนั่นเอง

1.2 การหาสมการการเคลื่อนที่

หลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองทางกายภาพขึ้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาก็คือแทนสมการการเคลื่อนที่ของระบบเข้ากับแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ สมการการเคลื่อนที่ของระบบอาจได้มาด้วยวิธีต่างๆ หลายวิธี เช่น การใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน การใช้กฎของการอนุรักษ์พลังงาน หรือกฎการเคลื่อนที่อื่นๆ ก็ได้ ซึ่งการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้มักจะสิ้นสุดด้วยสมการการเคลื่อนที่ซึ่งมักจะอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์

1.3 การหาผลเฉลยสมการการเคลื่อนที่

หลังจากได้สมการการเคลื่อนที่แล้วขั้นตอนต่อไปก็คือการหาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่ซึ่งมักจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ซึ่งอาจจะใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ขั้นพื้นฐานได้ก็ได้เช่น วิธีการแก้สมการอนุพันธ์ปกติหรือวิธีการเปลี่ยนรูปของลาปลาซ (Laplace's Transform) เป็นต้น หากว่าสมการอนุพันธ์มีความยุ่งยากมาก เช่น เป็นระบบสมการที่มีสมการอยู่หลายสมการหรือเป็นสมการไม่เชิงเส้น อาจต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการแก้ปัญหาสำหรับปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง ในขั้นตอนนี้จึงสามารถนำคอมพิวเตอร์มาช่วยแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขได้เป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลขใช้ว่าจะไม่มีข้อจำกัดในการใช้ข้อจำกัดของการแก้สมการด้วยวิธีเชิงตัวเลขคือ ไม่สามารถบอกลักษณะของคำตอบออกมาในรูปทั่วไปได้ในทุกกรณี นั่นคือ จะต้องแทนค่าคุณสมบัติทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในสมการเป็นค่าตัวเลข ดังนั้นเมื่อคุณสมบัติของระบบเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยอาจจะต้องใช้วิธีเชิงตัวเลขแก้ปัญหาใหม่ทั้งหมด ในขณะที่ผลที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์ปกติมักจะให้คำตอบออกมาในรูปของฟังก์ชัน ซึ่งการเปลี่ยนคุณสมบัติบางค่าของระบบอาจจะสามารถกระทำในขั้นของคำตอบได้โดยตรง

1.4 การวิเคราะห์ผลที่ได้

เมื่อได้คำตอบจากขั้นตอนที่ผ่านมาแล้วขั้นตอนสุดท้ายซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่ง คือจะต้องสามารถอธิบายและสรุปผลลัพธ์ที่ได้ไม่ว่าจะเป็นขนาดของแรงที่กระทำระยะการเคลื่อนไหว ความเร็ว ความเร่งหรืออื่นๆ ว่าเป็นคำตอบที่เหมาะสม เป็นไปตามความคาดหมายหรือเป็นไปได้หรือไม่ นอกเหนือจากนั้นในบางกรณียังจำเป็นที่จะต้องทดสอบ

ผลที่ได้จากการคำนวณกับระบบที่สร้างขึ้นไม่ว่าจะสร้างขึ้นจริงหรือเป็นระบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบกับปัญหานั้นๆ โดยเฉพาะก็ตาม ซึ่งขั้นตอนนี้จะช่วยให้สามารถหาจุดบกพร่องและแก้ไขปรับปรุงวิธีการแก้ปัญหาให้มีประสิทธิภาพหรือพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาเพื่อเกิดความปลอดภัยและประหยัดในการนำไปใช้งานมากยิ่งขึ้น

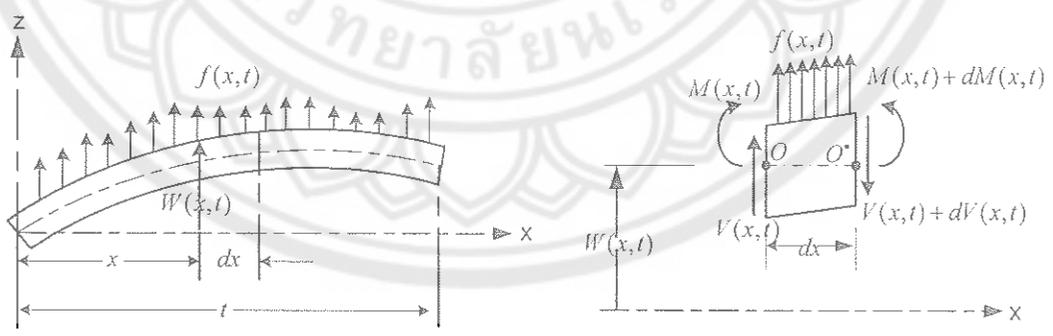
2. การสั่นสะเทือนของระบบต่อเนื่อง

การศึกษาการสั่นสะเทือนของระบบต่อเนื่องอย่างง่าย คือการสั่นสะเทือนของเส้นเชือกหรือการสั่นสะเทือนของคานนั้น สำหรับพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ที่ต้องใช้ในการศึกษานี้ก็คือวิธีการแก้ปัญหасмการอนุพันธ์ย่อย ซึ่งวิธีนี้นิยมใช้วิธีการแยกตัวแปร (Separation of Variables) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการแก้ปัญหасмการอนุพันธ์ย่อย นอกจากนั้นยังต้องใช้ทักษะในการแก้ปัญหาค่าเริ่มต้นและค่าขอบเขต (Initial and Boundary Value Problems) เพื่อสามารถหาผลตอบสนองของระบบที่กำหนดมาให้ได้อย่างถูกต้อง

2.1 การสั่นสะเทือนตามแนวขวางของคาน

พิจารณาจากภาพวัตถุอิสระในส่วนของคานดังแสดงในภาพ 5 เมื่อให้ $M(x, t)$ คือ โมเมนต์ดัด $V(x, t)$ เป็นแรงเฉือนภายในของคาน และ $f(x, t)$ เป็นแรงต่อหน่วยความยาวที่กระทำต่อคานนั้น เมื่อพิจารณาส่วนของคานนี้ พบว่าค่าความเฉื่อยของคานส่วนนี้ มีค่าเท่ากับ

$$\rho A(x) dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(w, t) \tag{2.21}$$



ภาพ 5 การสั่นตามแนวขวางของคาน

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของคานนี้ ภายใต้แรงกระทำจากภายนอก คือ

$$-(V + dV) + f(x,t)dx + V = \rho A(x)dx \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) \quad (2.22)$$

เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของคาน $A(x)$ เป็นพื้นที่หน้าตัดของคาน จากนั้นหากพิจารณาสมการของโมเมนต์รอบแกน y ซึ่งผ่านจุด O จากภาพ 5 จะได้

$$(M + dM) - (V + dV)dx + f(x,t)dx \frac{dx}{2} - M = 0 \quad (2.23)$$

หากเขียนค่าอนุพันธ์ของแรงเฉือนและโมเมนต์ให้อยู่ในรูป

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx \quad \text{และ} \quad dM = \frac{\partial M}{\partial x} dx$$

แล้วนำค่านี้ไปแทนลงในสมการ (2.22) และ (2.23) แล้วพิจารณาตัดพจน์ที่เป็นอนุพันธ์กำลังสองของ dx หรือ $(dx)^2$ ออกจากสมการ ทำให้เขียนสมการทั้งสองได้ในรูป

$$-\frac{\partial V}{\partial x}(x,t) + f(x,t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) \quad (2.24)$$

และ

$$\frac{\partial M}{\partial x}(x,t) - V(x,t) = 0 \quad (2.25)$$

ซึ่งสมการ (2.25) จะให้ผลเป็น

$$V = \frac{\partial M}{\partial x}$$

ซึ่งก็คือ แรงเฉือนจะเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ตัดตามแนวแกนของคาน จากนั้นแทนความสัมพันธ์นี้ลงในสมการ (2.24) จะได้

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}(x,t) + f(x,t) = \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) \quad (2.26)$$

จากทฤษฎีของคาน จะได้ความสัมพันธ์ของโมเมนต์ตัดและการยุบตัวของคานเป็น

$$M = EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.27)$$

เมื่อ E เป็นโมดูลัสความยืดหยุ่นของคาน และ $I(x)$ คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดรอบแกน y ดังนั้นถ้าหากแทนค่า M ตามสมการ (2.27) ลงในสมการ (2.26) จะได้

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) \right] + \rho A(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) = f(x,t) \quad (2.28)$$

สมการ (2.28) เป็นสมการการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของคานที่มีหน้าตัดไม่คงที่ และเกิดการสั่นภายใต้แรงกระทำ $f(x,t)$ แต่ถ้าหากคานนี้มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ I ก็จะเป็นค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (2.28) จะลดรูปเป็น

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial t^4}(x,t) + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) = f(x,t) \quad (2.29)$$

ถ้าหากพิจารณาในกรณีของการสั่นอิสระของคานที่มีหน้าตัดคงที่ จะได้สมการการเคลื่อนที่เป็น

$$c^2 \frac{\partial^4 w}{\partial t^4}(x,t) + \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) = 0 \quad (2.30)$$

เมื่อ

$$c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.31)$$

สมการ (2.30) นี้นิยมเรียกเป็นสมการออยเลอร์ของการสั่นของคาน โดยสมการการเคลื่อนที่นี้จะเป็นสมการอนุพันธ์อันดับ 4 ของระยะตามแนวแกนของคานและอนุพันธ์อันดับ 2 ของเวลา ดังนั้น สำหรับสภาพเริ่มต้นและสภาพที่ขอบเขตของคานนี้ทั้งหมดต้องมี สภาพที่ขอบเขต 4 ค่า ซึ่งโดยปกติจะเป็นค่าที่ปลายทั้งสองของคานด้านละ 2 ค่า รวม 4 ค่า และสภาพความเร็วเริ่มต้นและการขจัดเริ่มต้นของคาน รวม 2 ค่า คือ

$$w(x, t = 0) = w_0(x) \quad (2.32a)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}(x, t = 0) = \dot{w}_0(x) \quad (2.32b)$$

การหาค่าเฉลยของสมการ (2.30) สามารถทำได้ด้วยวิธีการแยกตัวแปร โดยให้

$$w(x, t) = W(x)T(t)$$

จากนั้น แทนลงในสมการ (2.30) และจัดรูปเพื่อแยกตัวแปร x และ t ออกจากกัน

$$\frac{c^2}{W(x)} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} = \frac{-1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = a = \omega^2 \quad (2.33)$$

โดย $a = \omega^2$ เป็นค่าคงที่ซึ่งมีค่าเป็นบวก สมการ (2.33) สามารถแยกออกจากกันและเขียนได้ในรูป

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \beta^4 W(x) = 0 \quad (2.34)$$

$$\frac{d^4 T(t)}{dt^4} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad (2.36)$$

จะพบว่า สมการ (2.34) และ (2.35) อยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์สามัญและมีสัมประสิทธิ์เป็นค่าคงที่ ซึ่งผลเฉลยของสมการจะอยู่ในรูป

$$T(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (2.37)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ สามารถหาค่าได้จากสภาพเริ่มต้นการสั่นสะเทือนในส่วนของสมการ (2.34) ซึ่งเป็นสมการอนุพันธ์อันดับ 4 โดยทั่วไปจะมองหาผลเฉลยของสมการนี้โดยให้มีผลเฉลยอยู่ในรูป

$$W(x) = C e^{sx} \quad (2.38)$$

เมื่อ C และ s เป็นค่าคงที่ จากนั้นแทนค่า $w(x)$ ตามสมการ (2.38) ลงในสมการ (2.37) แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$s^4 - \beta^4 = 0 \quad (2.39)$$

ทำให้ได้รากของสมการนี้เป็น

$$s_{1,2} = \pm \beta \quad (2.40a)$$

และ

$$s_{3,4} = \pm i\beta \quad (2.40b)$$

ดังนั้น ผลเฉลยของสมการ (2.34) จะมีรูปเป็น

$$W(x) = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + C_3 e^{i\beta x} + C_4 e^{-i\beta x} \quad (2.41)$$

เมื่อ C_1, C_2, C_3 และ C_4 เป็นค่าคงที่ สมการ (2.41) สามารถจัดได้ในรูป

$$W(x) = C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x + C_3 \cosh \beta x + C_4 \sinh \beta x \quad (2.42)$$

หรือ

$$W(w) = C_1 (\cos \beta x + \cosh \beta x) + C_2 (\cos \beta x - \cosh \beta x) \\ + C_3 (\sin \beta x + \sinh \beta x) + C_4 (\sin \beta x - \sinh \beta x) \quad (2.43)$$

จากสมการ (2.36) จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติของคานเป็น

$$\omega = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (2.44)$$

สำหรับคานทั่วไปจะมีจุดรองรับอยู่ 3 แบบ ซึ่งประกอบด้วยจุดรองรับอิสระ จุดรองรับอย่างง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่น โดยสภาพที่ปลายคานทั้ง 3 นี้สามารถรวมเป็นสภาพที่ปลายของคานหนึ่งๆ ได้ 6 แบบ โดยสมการความถี่ รูปร่างโหมด และค่าของ $\beta_n l$ ที่โหมดการสั่น n ต่างๆ นั้น ได้แสดงไว้ในตาราง 1

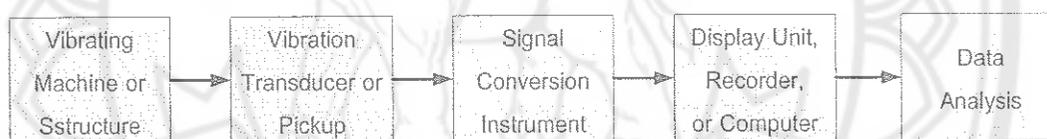
ตาราง 1 สภาพที่ขอบเขต รูปร่างโหมดและการสั่นตามแนวขวางของคาน

End Conditions	Frequency Equation	Mode Shape(Normal Function)	Value of
Pinned- Pinned 	$\sin \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n [\sin \beta_n x]$	$\beta_1 l = \pi$ $\beta_2 l = 2\pi$ $\beta_3 l = 3\pi$ $\beta_4 l = 4\pi$
Free-Free 	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = 1$	$W_n(x) = C_n [\sin \beta_n x + \sinh \beta_n x + \alpha_n (\cos \beta_n x + \cosh \beta_n x)]$ โดย $\alpha_n = \left(\frac{\sin \beta_n l - \sinh \beta_n l}{\cosh \beta_n l - \cos \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 4.730041$ $\beta_2 l = 7.853205$ $\beta_3 l = 10.995608$ $\beta_4 l = 14.137156$ ($\beta l = 0$ for rigid body mode)
Fixed-Fixed 	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = 1$	$W_n(x) = C_n [\sin h \beta_n x - \sin \beta_n x + \alpha_n (\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x)]$ โดย $\alpha_n = \left(\frac{\sinh \beta_n l - \sin \beta_n l}{\cos \beta_n l - \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 4.730041$ $\beta_2 l = 7.853205$ $\beta_3 l = 10.995608$ $\beta_4 l = 14.137156$
Fixed-Fixed, Cantilever 	$\cos \beta_n l \cdot \cosh \beta_n l = -1$	$W_n(x) = C_n [\sin h \beta_n x - \sin \beta_n x - \alpha_n (\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x)]$ โดย $\alpha_n = \left(\frac{\sin \beta_n l + \sinh \beta_n l}{\cos \beta_n l + \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 1.875104$ $\beta_2 l = 4.730041$ $\beta_3 l = 7.853205$ $\beta_4 l = 10.995608$
Fixed-Pined 	$\tan \beta_n l - \tanh \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n [\sin \beta_n x - \sinh \beta_n x + \alpha_n (\cosh \beta_n x - \cos \beta_n x)]$ โดย $\alpha_n = \left(\frac{\sin \beta_n l - \sinh \beta_n l}{\cos \beta_n l - \cosh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 3.926602$ $\beta_2 l = 7.068583$ $\beta_3 l = 10.210176$ $\beta_4 l = 13.351768$
Pined-Free 	$\tan \beta_n l - \tanh \beta_n l = 0$	$W_n(x) = C_n [\sin \beta_n x + \alpha_n \sinh \beta_n x]$ โดย $\alpha_n = \left(\frac{\sin \beta_n l}{\sinh \beta_n l} \right)$	$\beta_1 l = 3.926602$ $\beta_2 l = 7.068583$ $\beta_3 l = 10.210176$ $\beta_4 l = 13.351768$ ($\beta l = 0$ for rigid body mode)

ระบบการวัดการสั่นสะเทือน

ระบบการวัดการสั่นสะเทือนจะมีองค์ประกอบต่างๆ ตามที่แสดงในภาพ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบและขั้นตอนการวัดการสั่นสะเทือน จากภาพขั้นแรกจะเป็นขั้นตอนของเซนเซอร์/ทรานสดิวเซอร์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนปริมาณทางกลเช่น การขจัด ความเร็ว ความเร่ง หรือแรงกระทำให้กลายเป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้เช่น กระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ในขั้นต่อมา เนื่องจากการรับสัญญาณไฟฟ้าจากทรานสดิวเซอร์นั้น มักจะเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กหรืออาจมีสัญญาณรบกวน ทำให้มีสัญญาณอื่นนอกเหนือจากสัญญาณที่เกิดจากการสั่นรวมมากับสัญญาณแล้วเข้ามาสู่ระบบการวัดด้วย ดังนั้นอาจต้องมีการปรับสภาพสัญญาณที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป การปรับสภาพสัญญาณก็อาจจะเป็นการใช้เครื่องขยายสัญญาณให้สัญญาณมีขนาดใหญ่ขึ้น หรือใช้อุปกรณ์กรองสัญญาณเป็นต้น เมื่อสัญญาณได้รับการปรับสภาพที่เหมาะสมแล้ว ขั้นต่อไปสัญญาณก็จะเข้าสู่การแปลงค่าสัญญาณจากลักษณะที่เป็นอนาลอกให้เป็นสัญญาณในลักษณะของดิจิตอล เพื่อนำเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปประมวลผลต่อไป



ภาพ 6 ส่วนประกอบของอุปกรณ์การวัดการสั่นสะเทือน

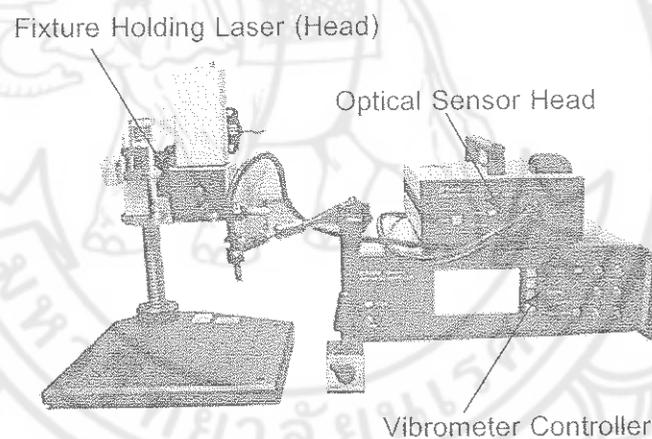
สำหรับเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนนั้นมีอยู่หลายแบบตามลักษณะของปริมาณที่จะวัด เช่น Vibrometer, Velocity Meter, Phase Meter Accelerometer, หรือ Frequency Meter แต่ถ้าหากว่าอุปกรณ์การวัดเหล่านี้ออกแบบมาเพื่อวัดและบันทึกค่าเหล่านั้นลงไปพร้อมกันด้วย คำลงท้ายด้วย "Meter" จะแทนด้วยคำว่า "Graph" ในบางกรณีมีความจำเป็นที่ต้องกระตุ้นให้เครื่องจักรหรือโครงสร้างเกิดการสั่นสะเทือนเพื่อที่จะหาคุณลักษณะของการสั่นพ้อง อุปกรณ์ที่ใช้กระตุ้นการสั่นสะเทือนก็ประกอบด้วย Electrodynamics Vibrators, Electro Hydraulic Vibrators เป็นต้น

สำหรับการทดสอบและวัดการสั่นสะเทือน การที่จะเลือกใช้เครื่องมือแบบใดหรือประเภทใดนั้น มีข้อที่ช่วยในการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. ย่านหรือช่วงความถี่และขนาดของการสั่นสะเทือน
2. ขนาดของชิ้นงานหรือโครงสร้างที่เกี่ยวข้อง
3. สภาพการทำงานของเครื่องจักร อุปกรณ์ หรือโครงสร้างที่เกี่ยวข้อง
4. ชนิดของอุปกรณ์ประมวลผล และอุปกรณ์ที่เก็บข้อมูล

สำหรับในภาคอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การวัดการสั่นสะเทือนในส่วน
ของแขนจับหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เครื่องมือที่ใช้ในปัจจุบัน คือ

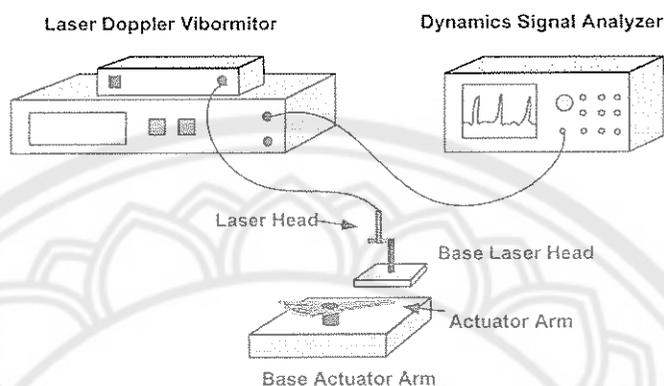
1. Laser Doppler Vibrometer (LDV) เป็นเครื่องวัดการสั่นสะเทือนทางแสง โดยส่วนประกอบ
ของเครื่องแอลดีวี (LDV) ได้แสดงในภาพ 7 มีอุปกรณ์คือ Vibrometer Controller ทำหน้าที่ใน
การกระตุ้นการสั่นสะเทือน Fixture Holding Laser (Head) ทำหน้าที่ยึดจับชิ้นงานไว้สำหรับการยิงแสง
ไปยังจุดที่ต้องการจะทดสอบและ Optical Sensor Head จะทำหน้าที่เป็นตัวยิงและรับสัญญาณแสง
ที่สะท้อนจากชิ้นงานในการวัดการสั่นสะเทือน



ภาพ 7 ส่วนประกอบของเครื่องแอลดีวี [9]

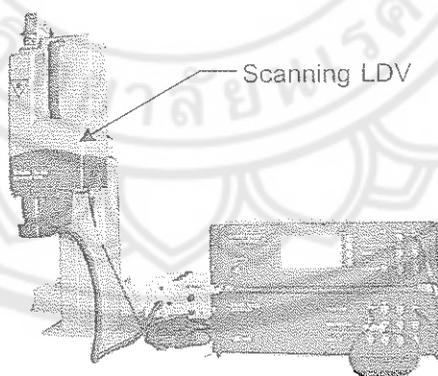
โดยการวัดการสั่นสะเทือนนั้นจะทำการยิงแสงไปยังตำแหน่งของชิ้นงานที่ต้องการ
จะทดสอบ และแสงที่ยิงไปยังวัตถุจะสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณแสงของเครื่องแอลดีวี
ผลการเคลื่อนที่ของวัตถุจะทำให้มุมของการสะท้อนกลับ (Phase angle) ของแสงที่สะท้อนกลับมา
เปลี่ยนแปลงไป โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงของมุมที่สะท้อนกลับมา เครื่องแอลดีวีก็จะแปลงเป็น
ระยะทางหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นๆ แล้วแสดงผลไปยัง Dynamics Signal Analyzer

(DSA) ซึ่งการทดสอบแต่ละครั้งจะสามารถยิงแสงไปที่วัตถุได้เพียงตำแหน่งเดียว โดยลักษณะการทำงานของเครื่องแอลดีวีได้แสดงในภาพ 8



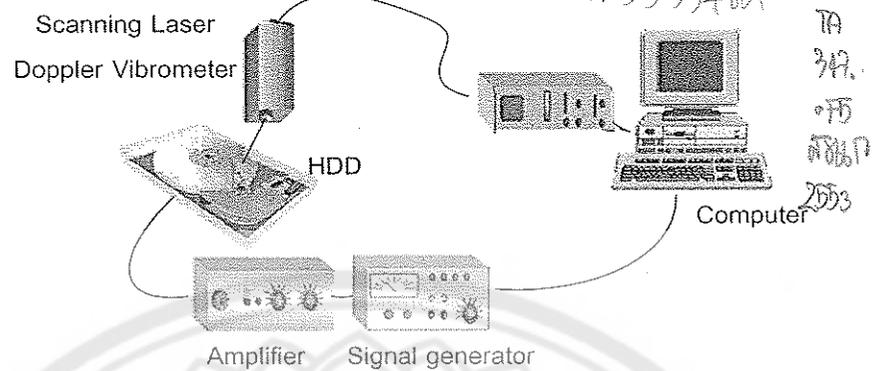
ภาพ 8 ลักษณะการทำงานของเครื่องแอลดีวี

2. Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV) เป็นเครื่องวัดการเคลื่อนที่ของแสงเช่นเดียวกับเครื่องแอลดีวี แต่เครื่องเอสแอลดีวี (SLDV) สามารถแสดงลักษณะของรูปแบบการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่ทดสอบออกมาได้ทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของเครื่องเอสแอลดีวี ได้แสดงในภาพ 9 และ 10 ตามลำดับ



ภาพ 9 ส่วนประกอบของเครื่องเอสแอลดีวี [9]

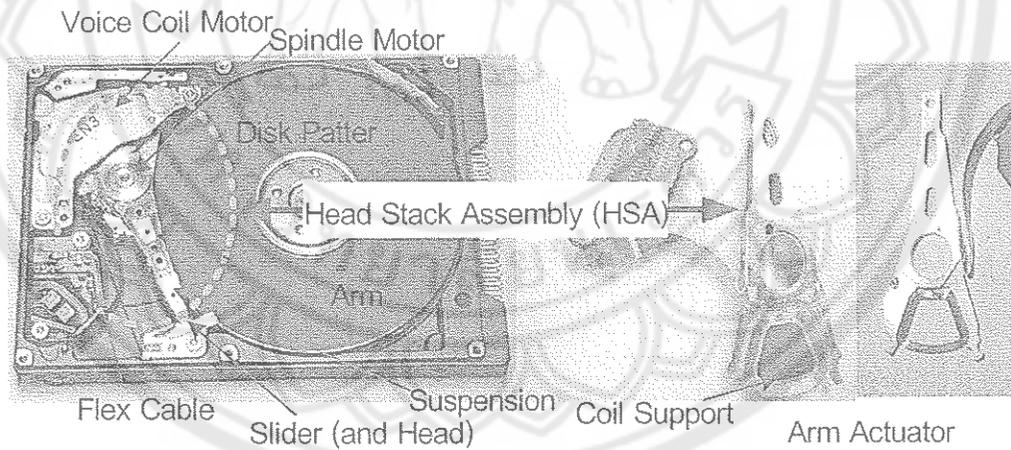
๒๘ ต.ย. ๒๕๕๔



ภาพ 10 ลักษณะการทำงานของเครื่องเอสแอลดีวี

ส่วนประกอบพื้นฐานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนประกอบรวมอยู่ด้วยกันหลายส่วน โดยแต่ละส่วนจะมีลักษณะทางโครงสร้างที่มีขนาดเล็กและแตกต่างกันดังแสดงในภาพ 11 โดยส่วนประกอบแต่ละส่วนก็จะทำหน้าที่แตกต่างกันโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [10]



ภาพ 11 ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [9]

1. จานฮาร์ดดิสก์ (Disk Platter)

จานฮาร์ดดิสก์ (Disk Platter) หรือดิสก์ (Disk) เป็นแหล่งเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยติดตั้งอยู่ในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยโครงสร้างภายในของแผ่นดิสก์นั้นประกอบด้วยชั้นต่างๆ 5 ชั้น ได้แก่

1.1 ฐาน (Substrate) เป็นเนื้อของอะลูมิเนียม (Aluminum) หรือแก้ว (Glass) ที่ผ่านขั้นตอนการขึ้นรูปเป็นแผ่นดิสก์ซึ่งมีความเรียบสูงความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกน้ำหนักเบา ถ้าผิวของแผ่นดิสก์ มีความเรียบมากจะเป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวสไลเดอร์ (Slider) กับแผ่นดิสก์ลดปัญหาเรื่องหัวสไลเดอร์ติดกับแผ่นดิสก์ และทำให้สัญญาณตบกลับจากการอ่านที่คงที่ ในปัจจุบันถ้าเป็น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รุ่น 2.5" ใช้แก้วเป็นฐาน และรุ่น 3.5" ใช้อะลูมิเนียม ซึ่งในกรณีของอะลูมิเนียมต้องเคลือบด้วย Nickel-Phosphorus Plated ก่อนเพื่อให้ผิวของอะลูมิเนียมเกิดความแข็งแรง

1.1.1 ชั้นล่าง (Under Layer) เป็นชั้นที่ช่วยในการสร้างและรวมตัวของสารแม่เหล็กชั้นเป็นโครงสร้างเพื่อแสดงคุณสมบัติของสารแม่เหล็กโดยใช้โครเมียม (Chromium: Cr) ซึ่งเป็นธาตุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีโครงสร้างที่ช่วยให้ทิศทางของสนามแม่เหล็กชี้ไปในทิศทางเดียวกันเมื่ออยู่บนแผ่นดิสก์

1.1.2 ชั้นแม่เหล็ก (Magnetic Layer) เป็นชั้นของสารแม่เหล็กที่เคลือบลงไปเพื่อให้แสดงคุณสมบัติการเหนี่ยวนำแม่เหล็กเมื่อมีการเขียนสัญญาณบนแผ่นดิสก์ โดยสารแม่เหล็กที่ใช้คือ CoPtCrB

1.2 โคบอลต์ (Cobalt: Co) เป็นสารแม่เหล็กที่มีทิศทางของสนามแม่เหล็กชี้ไปในทิศทางเดียวกัน (Ferro Magnet) โดยเป็นสารแม่เหล็กแบบอ่อน (Soft Magnet) ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก แต่เมื่อนำไปรวมกันกับสารที่มีอะตอมขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดสารแม่เหล็กที่มีค่าความเหนี่ยวนำสารแม่เหล็กสูง

1.3 แพลทินัม (Platinum: Pt) เป็นสารที่มีอะตอมขนาดใหญ่ ซึ่งถ้าสร้างพันธะกับโคบอลต์แล้วจะให้ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กสูงถึง 2,000 Oe (เออร์สเตด)

1.4 โครเมียม (Chromium: Cr) เป็นสารที่มีอะตอมขนาดใหญ่อีกตัวหนึ่งที่สร้างพันธะกับคาร์บอนนอกจากนั้นแล้ว ยังช่วยในการลดปัญหาเรื่องสนิม และปัญหาสัญญาณรบกวนได้อีกด้วย

1.5 โบรอน (Boron: B) เป็นสารที่ช่วยลดสัญญาณรบกวน

1.5.1 ชั้นบน (Over Layer) เป็นการเคลือบผิวเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชั้นของสารแม่เหล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียหายที่อาจเกิดจากการเข้าไปอ่านหรือเขียนสัญญาณของ HSA ในแต่ละครั้ง สารที่ใช้คือ คาร์บอน (Carbon) เนื่องจากมีโครงสร้างเหมือนเพชรจึงทำให้มีความแข็งแรง นอกจากนั้นแล้วยังมีคุณสมบัติพิเศษที่เชื่อต่อการทำปฏิกิริยาเคมี (Chemical Inertness) และความสามารถในการต้านทานการนำไฟฟ้าสูง

1.5.2 ชั้นหล่อลื่น (Lubricant Layer) เป็นชั้นที่ช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างหัวสไลเดอร์กับแผ่นดิสก์ สารที่ใช้คือ Perfluoropolyether ซึ่งนอกจากจะลดแรงเสียดทานแล้วยังเชื่อต่อการทำปฏิกิริยาเคมี (Chemical Inertness)

2. Coil Support

Coil Support ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในขดลวด โดยสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นบริเวณรอบๆ ขดลวดเมื่อนำเข้าไปใกล้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร (VCM) จะส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดและแรงผลักขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ HSA เกิดการเคลื่อนที่ นอกจากนี้แล้ว Coil Support ยังเป็นฐานสำหรับการประกอบชิ้นส่วนอื่นๆ ที่รวมกันเป็น HSA ซึ่งได้แก่ HGA Up, HGA Down, Pivot และแผ่นเฟล็กซ์ (Flex Cable) อีกด้วย

3. Spindle Motor

Spindle Motor เป็นตัวขับเคลื่อนให้แผ่น Disk หมุน โดยลักษณะของ Spindle Motor สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รุ่น 1.0", 2.5" และ 3.5" นั้นมีหลักการทำงานที่คล้ายกัน โดยอาศัยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวด ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณขดลวด (Stator) กับขั้วแม่เหล็กถาวร (Rotor) โดยขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกันจะเกิดแรงผลักกันและขั้วที่แตกต่างกันจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน เมื่อแรงดึงดูดและแรงผลักรวมกันอย่างต่อเนื่องจึงทำให้มอเตอร์เกิดการหมุน ปัจจุบัน Spindle Motor ที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีอยู่ 2 แบบ คือ

3.1 Ball Bearing Spindle Motor (BB) คือ Spindle Motor ที่ใช้ Bearing เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับทำให้เกิดการหมุน

3.2 Fluid Dynamic Bearing Spindle Motor (FDB) เป็นการนำเทคโนโลยีใหม่เข้ามาแทน Spindle Motor แบบ Ball Bearing เนื่องจากในบางช่วงจังหวะที่ Spindle Motor หมุนอยู่นั้น อาจทำให้เกิดปัญหา Ball Bearing ขนกับแกนของ Sleeve และส่งผลให้แผ่น Disk เกิดการลั่นสะเทือน ดังนั้นจึงใช้ของเหลว (Fluid) ที่มีคุณสมบัติของน้ำมันเข้ามาแทน Bearing โดยเมื่อ Spindle Motor เกิดการหมุน ของเหลวที่บรรจุอยู่ภายในช่องว่างระหว่าง Sleeve กับ Shaft จะช่วยทำให้ FDB หมุนได้สะดวก และไม่เกิดปัญหาการกระแทกกันระหว่างโลหะของ Ball Bearing กับแกนของ Sleeve และ Shaft

4. Voice Coil Motor

Voice Coil Motor (VCM) เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่ช่วยทำให้ HSA เกิดการเคลื่อนที่ โดยโครงสร้างของตัว VCM นั้นประกอบด้วยแม่เหล็ก 2 ชั้น แต่ละชั้นจะประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 2 ขั้ว คือ ขั้วเหนือกับขั้วใต้ เมื่อประกอบเป็นตัว VCM แม่เหล็ก 2 ชั้นที่มีขั้วต่างกันจะเกิดการดึงดูดกัน (จากหลักการของแม่เหล็ก ขั้วที่เหมือนกันเกิดแรงผลักกัน ขั้วที่แตกต่างกันเกิดแรงดึงดูดกัน) เมื่อนำมาประกอบกับ HSA ที่มี Coil Support เป็นส่วนฐานและทำหน้าที่ในการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้บริเวณรอบๆ VCM มีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น

ดังนั้นขั้วแม่เหล็กที่เหมือนกันจะเกิดแรงผลักกัน ส่วนขั้วที่ต่างกันจะเกิดแรงดูดกัน จึงเกิดแรงดึงดูดและแรงผลักขึ้นรอบๆ สนามของแม่เหล็กและ VCM ส่งผลให้ HSA เกิดการเคลื่อนที่นั่นเอง ส่วนการเคลื่อนที่ของ HSA จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ Coil Support

5. สไลเดอร์ (Slider)

สไลเดอร์ทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนสัญญาณลงบนแผ่นดิสก์ สำหรับสไลเดอร์มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ หัวเขียนและหัวอ่าน โดยแยกอธิบายแต่ละส่วนประกอบได้ดังนี้

5.1 หัวเขียน (Write Head) อาศัยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดตัวนำที่พันรอบแกนเหล็ก หรือเฟอร์ไรต์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นบริเวณเนื้อของวงแหวนทิศทางของสนามแม่เหล็กจะพุ่งออกจากบริเวณส่วนปลาย หรือช่องว่างของวงแหวนที่เป็นรอยขาด พุ่งตรงไปยังเนื้อของแผ่นดิสก์เพื่อบังคับให้แม่เหล็กบริเวณผิวของแผ่นดิสก์เปลี่ยนทิศทางตามคำสั่ง

5.2 หัวอ่าน (Read Head) หัวอ่านที่ใช้ในฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ Magneto Resistance (MR) และ Giant Magneto Resistance (GMR) ซึ่งผลจากการทดลองของนักวิทยาศาสตร์พบว่า เมื่อแม่เหล็กได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กภายนอก จะทำให้ทิศทางของแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนไปตามทิศทางของแม่เหล็กที่เข้ามากระทำ นอกจากนั้นแล้วยังพบว่า ค่าความต้านทานของแม่เหล็กนั้นเปลี่ยนไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Magneto Resistance (MR) ซึ่งเป็นหลักการของหัวอ่านในยุคเริ่มแรก ต่อมาได้มีการพัฒนาให้หัวอ่านสามารถอ่านข้อมูลที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟมีความจุต่อตารางนิ้วสูง หรือเรียกหัวอ่านแบบนี้ว่า Giant Magneto Resistance (GMR)

6. Head Stack Assembly (HSA)

Head Stack Assembly (HSA) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่อ่านและเขียนสัญญาณแม่เหล็ก ลงบนแผ่นดิสก์ โดยเป็นการนำชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นมารวมกัน ได้แก่ Coil Support, แขนอ่าน (Arm), HGA, แผ่นเฟล็กซ์ (Flex Cable) และพรีแอมป์ (Preamp) เป็นต้น

โดยภายในตัว HSA จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่อ่านและเขียนสัญญาณ นั่นก็คือ สไลเดอร์ ซึ่งตัวสไลเดอร์มีโครงสร้างภายในที่สลับซับซ้อนมาก เนื่องจากเป็นการนำชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นมารวมกัน ซึ่งถือว่าเป็นหัวใจหลักของการอ่าน/เขียนข้อมูลเมื่อมีการอ่านสัญญาณหัวสไลเดอร์ที่ทำการอ่าน (Read Head) จะนำสัญญาณส่งมาขยายที่ Arm Electronic (AE) เพื่อให้ได้ความแรงของสัญญาณ หลังจากนั้นจึงส่งสัญญาณไปที่ Pin Connector เพื่อเชื่อมต่อให้แผ่นวงจรถอดรหัส และทำการประมวลผลต่อไป

ในการเขียนสัญญาณ ข้อมูลจากแผ่นวงจรจะถูกส่งผ่านมาทาง Pin Connector โดยมี AE Module ทำหน้าที่ในการเลือกหัวที่ใช้ในการเขียนสัญญาณ (Write Head) หลังจากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังหัวเขียนที่ได้เลือกไว้เพื่อทำการเขียนสัญญาณลงบนแผ่นดิสก์ต่อไป

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Weilu Wang, et al. [11] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความถี่เรโซแนนซ์ที่หัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยได้วิเคราะห์สัญญาณเสียงในขณะที่หัวอ่าน/เขียนกำลังทำงาน ซึ่งใช้ตัวไมโครโฟนเป็นตัวจับสัญญาณเสียงแล้วส่งผ่านเครื่องกรองสัญญาณ โดยค่า Power Spectrum Density (PSD) ที่วัดได้ก็คือ สัญญาณเสียงรบกวนจากสภาพแวดล้อม สัญญาณเสียงรบกวนจากการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ และอื่นๆ ซึ่งปกติค่าเรโซแนนซ์เหล่านี้จะวัดโดยใช้เครื่องแอลดีวีและดีเอสเอ (DSA) ดังนั้นวิธีการที่ศึกษานี้ก็เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้วัดค่าเรโซแนนซ์ที่หัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ หากไม่ต้องการทราบตำแหน่งการเกิดสัญญาณ (Position Error Signal: PES)

Gih Keong Lau, et al. [12] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของรูปทรงที่เหมาะสมที่สุด (Topology Optimization) สำหรับตัว Suspension เพื่อเพิ่มความจุในการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นการพัฒนาในส่วนของการเข้าถึงข้อมูลที่ข้องเกี่ยวกับการสั่นสะเทือน โดยจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนในขณะที่เข้าถึงข้อมูล การออกแบบรูปทรงที่เหมาะสมนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติทางไดนามิกส์ของตัว Suspension โดยในงานวิจัยได้ทำการปรับปรุงค่าความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นสะเทือนลำดับแรกของการบิดตัว (First Torsional) ของตัว Suspension

Haruhide Takahashi and David B. Bogy [13] ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับผลของแรงเสียดทานระหว่างหัวสไลด์เตอร์กับแผ่นดิสก์จากการสั่นสะเทือนของ Head Suspension ขณะบันทึกข้อมูล โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยการวัดการสั่นสะเทือนของสไลด์เตอร์ในทิศทางแนวระนาบ (Transverse Direction) ได้ใช้เครื่องแอลดีวีในการวัดทั้งในสภาวะการลอยตัว (Flying) และสภาพแนบชิด (Proximity) ส่วนการสั่นสะเทือนในทิศทางแนวตั้ง (Vertical Direction) ได้ใช้เครื่องเอสแอลดีวีในการวัด จากผลการทดสอบพบว่า ระดับของมุมในการเคลื่อนตัวขณะทำงานของ Head Suspension ส่งผลต่อการเกิดแรงเสียดทานระหว่างหัวสไลด์เตอร์กับแผ่นดิสก์ เนื่องจากการสั่นสะเทือนของ Head Suspension

Shigeo Nakamura, et al. [14] ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำการสั่นสะเทือน (Flow-Induced Vibration) ในส่วนของ Head Gimbal Assembly (HGA) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ โดยมีเป้าหมายที่จะทดสอบเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของแรงลมที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยในส่วนของเฮจจีเอ (HGA) โดยเฮจจีเอที่ใช้ศึกษามีความยาว 14.5 mm (จากจุดศูนย์กลางของจานดิสก์ไปยังสไลด์เตอร์) วัดผลการสั่นสะเทือนโดยเครื่องแอลดีวี ภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกัน อาทิ ตำแหน่งของความยาวรัศมีกับสไลด์เตอร์ ความเร็วในการหมุนของจานดิสก์ ระยะห่างระหว่างอาร์มกับดิสก์ และอุณหภูมิ โดยพบว่าตำแหน่งความยาวของรัศมีกับสไลด์เตอร์แรงลมจะมีปริมาณมากเมื่อสไลด์เตอร์ อยู่ห่างจากตำแหน่งเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุด โดยเมื่อกำหนดให้สไลด์เตอร์ อยู่ในตำแหน่งที่ยึดติดแรงลมจะสัมพันธ์กับความเร็วรอบในการหมุนของจานดิสก์ คือเมื่อความเร็วรอบเพิ่ม แรงลมก็จะเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิสูงๆ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ก็จะลดลงส่วนขนาดการสั่นสะเทือนจะเพิ่มขึ้น และควรมีระยะห่างระหว่างอาร์มกับดิสก์ที่เหมาะสมสำหรับผลของค่าเรโซแนนซ์ในแต่ละรูปแบบการสั่นสะเทือน ดังนั้นผลที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินเฮจจีเอและสามารถใช้เฮจจีเอได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาใช้ในการตั้งค่าตัวเฮจจีเอภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

Li Mei, Xu, et al. [15] ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของ Quasi-Rigid Body (QR modes) ในส่วนของแขนจับหัวอ่าน/เขียนซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลจากการทดลองจะนำเสนอในรูปแบบของผลตอบสนองค่าความถี่ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ใช้วิเคราะห์ลักษณะของรูปแบบการสั่นสะเทือนของแขนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีการที่ยึดติดบริเวณช่องใส่เบร้ง โดยจากการวิเคราะห์และการวัดจริงโดยแอลดีวีได้แสดงรูปแบบของการสั่นสะเทือนไว้ด้วยกัน 6 โหมด โดยปัญหาการสั่นสะเทือนนี้อาจเกิดขึ้นจากความยืดหยุ่นของ Pivot Bearing และความแข็งตริงที่แตกต่างกันของ Ball Bearings ในระบบ

Sheng Zeng, et al. [16] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเวลาในการเข้าถึงข้อมูลซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ปัจจุบัน ปัญหาเรโซแนนซ์ของหัวอ่าน/เขียนที่เกิดขึ้นโดย Pivot-Bearing Stiffness เป็นปัญหาเร่งด่วนที่ต้องแก้ไข ดังนั้นปัญหาเรโซแนนซ์จึงกลายเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบเพื่อลดข้อจำกัดของเวลาการเข้าถึงข้อมูลและปรับปรุงสัญญาณการควบคุมในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งได้ศึกษาทางด้านแมคคานิกส์และไดนามิกส์จากการเปลี่ยนแรงขับเคลื่อนของรูปคลื่นโดยดูจากเศษตกค้างจากการสั่นสะเทือนและลักษณะเฉพาะของรูปคลื่นว่าส่วนไหนมีค่าเป็นศูนย์หรือลดต่ำลงมากที่สุด โดยการซิมพลิฟายแบบจำลองและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะได้ว่าถ้ารูปคลื่นและช่วงเวลาการกระตุ้นการค้นหาเลือกอย่างเหมาะสมแล้ว เศษตกค้างจากการสั่นสะเทือนจะมีน้อยมากและเวลาการเข้าถึงข้อมูลก็จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว

