# การศึกษาค่าความเร็ววิกฤตของการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อแบบวิฑูรย์คอนทัวร์กับรางชนิด BS100A ขนาดความกว้างราง 1.000 เมตร ของการรถไฟแห่งประเทศไทย

# The study of critical speeds from dynamical responses of Vidura contour train wheel set with BS100A rail profile on a meter gauge track of the State Railway of Thailand.

กิติพัฒน์ จักรสูง[1]*,ดร.กรรมมันต์ ชูประเสริฐ[1] ,ดร.ธนา ภู่เผือกรัตน์[2], และ ดร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ[1]

[1] KURAIL ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900
*Kittiphat710@hotmail.com, fengkmc@ku.ac.th, wichai.s@ku.ac.th
[2]วิศวกรเครื่องกล แผนกวิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย
*thana.p@railway.mail.go.th

***บทคัดย่อ***

บทความนี้นำเสนอการศึกษาค่าความเร็ววิกฤตของการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อแบบวิฑูรย์คอนทัวร์กับรางชนิด BS100A ที่ขนาดความกว้างราง 1.000 เมตร ที่มีการใช้งานโดยการรถไฟแห่งประเทศไทย บทความนี้ได้แสดงถึงแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของความเร็ววิกฤตต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกดเพลา และความแตกต่างของการตอบสนองทางพลวัตของชุดเพลาล้อต่อปฏิสัมพันธ์ของล้อและรางที่ต่างกันในกรณีของล้อแบบวิฑูรย์คอนทัวร์ที่ไม่มีการสึก และ มีการสึกจากการใช้งานจริงของการรถไฟแห่งประเทศไทย ผลจากการจำลองแบบสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดความเร็วในการใช้งานที่เหมาะสมของการรถไฟแห่งประเทศไทยได้ต่อไป

***Abstract***

This paper presents the study of critical speeds from dynamical responses of Vidura contour train wheel set with BS100A rail profile on a meter gauge track utilized by the State Railway of Thailand (SRT). This paper shows the tendency of critical speed variations to the change of wheelset loads and differences of dynamical responses to differences of wheel rail interaction for unworn and worn Vidura contours of SRT. The results of these simulations can be utilized in specifying the speed limits of trains by SRT.

***Keywords:*** Critical Speed, Lateral Dynamic, Vidura Profile, BS100A, Wheel-Rail Interface

## 1. บทนำ

ประเทศไทยได้ดำเนินกิจการขนส่งระบบรางมามากกว่าร้อยกว่าปีมาแล้ว เพื่อที่จะใช้สำหรับการเดินทาง ติดต่อสื่อสาร ขนส่งสิ่งของ ขนส่งแลกเปลี่ยนย้ายอีกที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์และทางด้านการพัฒนาประเทศ หลายๆ ประเทศได้มีการพัฒนาระบบการขนส่งระบบรางให้มีความทันสมัย สะดวกรวดเร็วและความปลอดภัย ทำให้ประเทศเหล่านั้นได้มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางการขนส่งระบบรางขั้นสูง เพราะมีการศึกษาเชิงลึกและการทำวิจัยการขนส่งระบบรางอย่างต่อเนื่อง

เริ่มแรกการรถไฟแห่งประเทศไทยได้ใช้คอนทัวร์ล้อเดิมของรถจักรไอน้ำและรถจักรดาเวนปอร์ต ซึ่งขณะนั้นประสบปัญหารถตกรางในทางโค้งรัศมี 180 เมตร หลายครั้ง จนทำให้ผู้เชี่ยวชาญทางด้านการช่างกล (คุณหลวงวิฑูรย์วิธีกล) [1] ได้ทำการแก้ไขคอนทัวร์ล้อใหม่ที่เรียกว่า “วิฑูรย์คอนทัวร์” ทำให้ได้ขจัดปัญหารถจักรดีเซลดาเวนปอร์ตที่ตกรางบ่อยได้สำเร็จ นับตั้งแต่นั้นเป็นตนมาได้ใช้วิฑูรย์คอนทัวร์มาโดยตลอด ในส่วนชนิดรางเป็น BS100lbAได้ใช้มาตรฐานอังกฤษ(BS) [2] ที่กำหนดเป็นปอนด์ต่อหลา การเปลี่ยนแปลงคอนทัวร์ล้อแบบใหม่ (วิฑูรย์คอนทัวร์) ได้ส่งผลตามมาซึ่งไม่ได้มีการศึกษาทางด้านการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนทัวร์ล้อกับรางและการตอบสนองทางด้านพลวัตของชุดเพลาล้อเป็นอย่างไร ยิ่งไปกว่านั้นขณะที่ล้อวิ่งบนรางด้วยความเร็วจะทำให้คอนทัวร์ล้อสึกหรอไปเรื่อยๆ ทำให้การเคลื่อนที่ผิดปกติไปจากเดิมและเป็นอันตรายจนทำให้รถจักรตกรางในที่สุด

งานวิจัยนี้ได้ร่วมการจับมือระหว่าง KURAIL มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์(บางเขน)กับการรถไฟแห่งประเทศไทย เพื่อที่จะศึกษาการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อวิฑูรย์คอนทัวร์และรางชนิด BS100A หาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงความเร็ววิกฤตต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกดเพลาและหาความแตกต่างของการตอบสนองทางด้านพลวัตของเพลาล้อต่อปฏิสัมพันธ์ของล้อในกรณีของล้อไม่มีการสึกหรอและล้อที่มีการสึกหรอ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ชุดเพลาล้อแบบง่าย[3] เริ่มต้นต้องหาปฏิสัมพันธ์ระหว่างล้อและราง [3] ความแตกต่างของรัศมีล้อต่อระยะการเคลื่อนที่แนวด้านข้างของตัวรถจักร($\lambda$) และนำไปสู่สมการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถจักร [3] จากนั้นปัจจัยที่จะศึกษาพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกดเพลาส่งผลให้ค่า Creep coefficients เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถจักรเป็นอย่างมาก ความเร็วมีที่เปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่แนวทางด้านข้างของตัวรถจักรจะเกิดเสถียรภาพมากขึ้นไปด้วย และคอนทัวร์ล้อที่เกิดการสึกหรอจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง ซึ่งค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของรถจักรจะต้องลดลงตามไปด้วย

เพื่อสามารถนำไปสู่การกำหนดค่าความเร็ววิกฤตวิฑูรย์คอนทัวร์แบบมีการสึกหรอ เพื่อนำไปเป็นข้อมูลหาแนวโน้มและสนับสนุนในการใช้งานจริงของการรถไฟแห่งประเทศไทย

## 2. วัตถุประสงค์

2.1.เพื่อศึกษาค่าความเร็ววิกฤตของการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อแบบวิฑูรย์คอนทัวร์กับรางชนิด BS100A

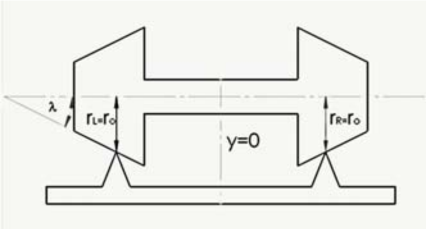
2.2.เพื่อศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของความเร็ววิกฤตต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกดชุดเพลาล้อ

2.3.เพื่อศึกษาความแตกต่างของการตอบสนองทางพลวัตของชุดเพลาล้อต่อปฏิสัมพันธ์ของล้อและรางที่ต่างกันในกรณีของล้อแบบวิฑูรย์คอนทัวร์ที่ไม่มีการสึกหรอและมีการสึกหรอ

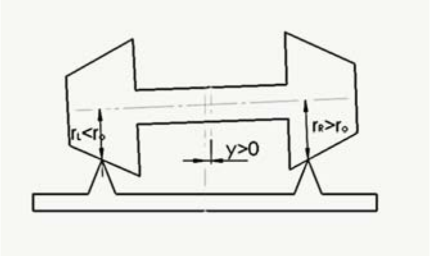
## 3.ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 3.1. Equivalent Conicity ($\lambda$)

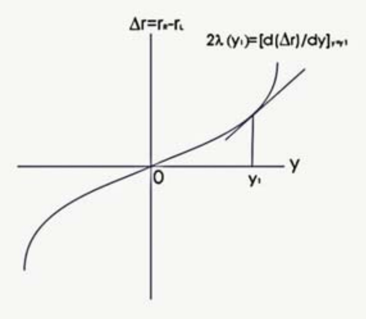
ค่า Equivalent Conicity หรือ Conicity แทนด้วยสัญญาลักษณ์ ($\lambda$) [4] ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางรูปร่างผิวของล้อและผิวของรางของรถจักรที่สัมผัสกัน เมื่อเพลาล้อวางตัวอยู่บนรางในตำแหน่งสมดุลรัศมีทั้งล้อซ้ายและล้อขวาจะเท่ากัน ($r_0$) รูปที่ 1. เมื่อเพลาล้อเลื่อนตำแหน่งไประยะ +y จะทำให้รัศมีของล้อซ้ายมีค่าน้อยกว่ารัศมีตำแหน่งสมดุล ($r_L<r_0$) และรัศมีของล้อขวามีค่ามากกว่ารัศมีตำแหน่งสมดุล ($r_R>r_0$) รูปที่ 2. ความแตกต่างของรัศมีล้อซ้ายและล้อขวาทำให้เกิดความสัมพันธ์ฟังก์ชันแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear) รูปที่ 3.




รูปที่ 1 ชุดเพลาล้ออยู่ในตำแหน่งสมดุล y=0 ,$r_L=r_R=r_0$




รูปที่ 2 ชุดเพลาล้อเคลื่อนที่ระยะ +y



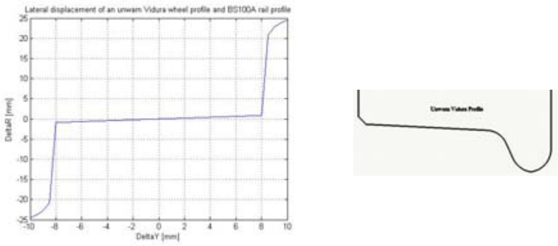

รูปที่ 3. ความแตกต่างของรัศมีล้อซ้ายและล้อขวาต่อระยะเคลื่อนที่ชุดเพลาล้อ

ค่า Conicity ($\lambda$) จะหาได้จากสมการที่ (1) [4]

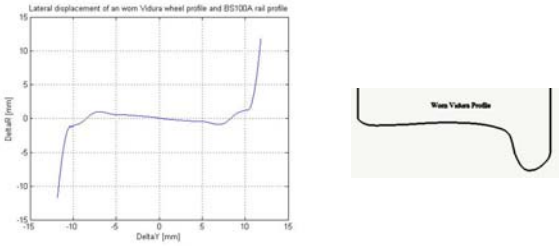
$$\lambda(y)=\frac{1}{2}\frac{d\Delta r}{dy} \qquad (1)$$

### 3.2. วิฑูรย์คอนทัวร์

การใช้คอนทัวร์เดิมเกิดปัญหารถจักรดีเซลดาเวนเปอร์ตตกรางบ่อยครั้งสืบเนื่องจาก Wheel flange contour เดิมของรถจักรไอน้ำและรถจักรดีเซลที่ใช้งานครั้งแรกมีความไม่เหมาะอยู่หลายประการ [1] จึงได้มีการเปลี่ยนมาเป็นวิฑูรย์คอนทัวร์และใช้งานจนถึงปัจจุบันนี้ดังรูปที่ 4. วิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่สึกหรอและความแตกต่างของรัศมีล้อซ้าย-ขวาต่อระยะเคลื่อนที่ชุดเพลาล้อซึ่งสามารถให้ชุดเพลาล้อเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างที่อยู่รางได้ในช่วง -8 ถึง +8 มิลิเมตร รูปที่ 5. วิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอและความแตกต่างของรัศมีล้อซ้าย-ขวาต่อระยะเคลื่อนที่ชุดเพลาล้อ ซึ่งได้จากการวัดค่าจากวิฑูรย์คอนทัวร์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว 3 แสนกิโลเมตร [5] สามารถให้ชุดเพลาล้อเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างที่อยู่รางได้ในช่วง -8 ถึง 8 มิลิเมตรและสิ่งที่น่าสนใจค่า Conicity ($\lambda$) จะมีค่าเป็นลบ แต่ถ้าเป็นวิฑูรย์คอนทัวร์ใหม่ค่า Conicity ($\lambda$) จะมีค่าเป็นบวก



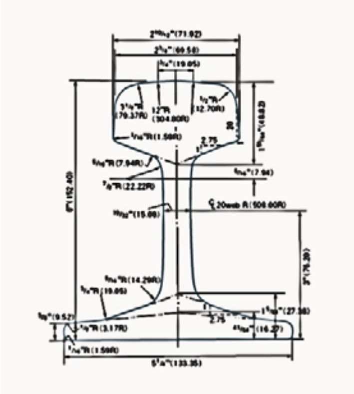
รูปที่ 4. วิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่สึกหรอและความแตกต่างของรัศมีล้อซ้าย-ขวาต่อระยะเคลื่อนที่ชุดเพลาล้อและรางชนิด BS100A ด้วยความกว้างราง 1 เมตร



รูปที่ 5. วิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอและความแตกต่างของรัศมีล้อซ้าย-ขวาต่อระยะเคลื่อนที่ชุดเพลาล้อและรางชนิด BS100A ด้วยความกว้างราง 1 เมตร

### 3.3 รางชนิด BS100A

การรถไฟแห่งประเทศไทยได้ใช้รางชนิด BS100lbsA [2] ซึ่งเป็นมาตรฐานของประเทศอังกฤษ (British Standard) รูปที่ 6. และใช้ขนาดความกว้างราง 1 เมตร. (Metre guage)



รูปที่ 6. รางชนิด BS100A

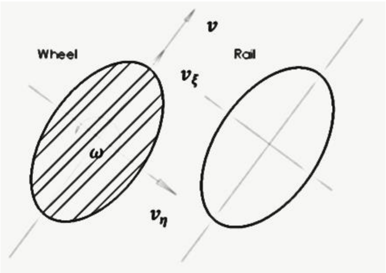
### 3.4. Creep

Creepage[3] เกิดจากความเร็วสไลด์ระหว่างพื้นผิวของล้อและพื้นผิวของรางที่จุดสัมผัสกัน รูปที่ 7. ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ Lateral Creep , Longitudinal Creep และ Spin Creep จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของตัวรถ สามารถหาค่าจากได้จากสมการดังต่อไปนี้

Lateral Creep, $V_\eta = \frac{v_\eta}{v}$ (2)

Longitudinal Creep, $V_\xi = \frac{v_\xi}{v}$ (3)

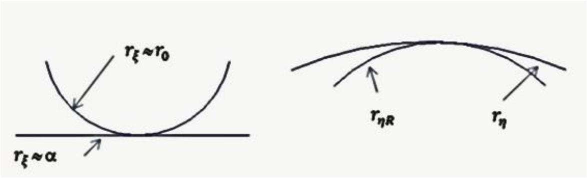
และ Spin Creep, $\phi = \frac{\omega}{v}$ (4)




รูปที่ 7. ความเร็วสไลด์และความเร็วหมุนที่ตำแหน่งสัมผัสกัน

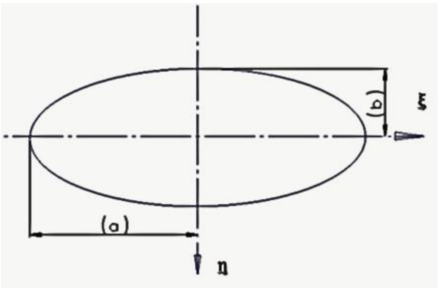
### 3.5. Normal contact force and contact patch

ทฤษฎีของ Hertz theory[3] จะช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาของ Normal contact ที่เกิดจากล้อรถและรางรถไฟสัมผัสกันทำให้เกิดพื้นที่สัมผัสเป็นวงรี โดยพิจารณาส่วนโค้งของรัศมีของล้อและรางในแนว Lateral direction และแนว Longitudinal direction แสดงในรูปที่ 8.




รูปที่ 8. รัศมีของล้อและรางในแนว Lateral และ Longitudinal direction

ทฤษฎีของ Hertz กล่าวไว้ว่าพื้นที่สัมผัสของล้อและรางจะเป็นแบบวงรี โดยจะหาค่าความยาวครึ่งหนึ่งของแกนเอก (a) และ และแกนโท (b) แสดงรูปที่ 9. และสามารถคำนวณหาค่าตามสมการดังต่อไปนี้




รูปที่ 9. พื้นที่สัมผัสของล้อและรางเป็นรูปวงรี โดยประกอบด้วยแกน a และ b

- หาฟังก์ชัน A และ B จากสมการ (5) และ (6)

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r_{\eta R}} - \frac{1}{r_\eta}\right) \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{r_{\xi R}} - \frac{1}{r_\xi}\right) \quad (6)$$

- หาค่าคงที่ m และ n จากฟังก์ชันมุมของ Hertz'theory จากตาราง [3] และสมาการ (7)

$$\Theta = \arccos\left(\frac{A-B}{A+B}\right) \quad (7)$$

- หาค่า a และ b จากสมการ (8) และ (9)

$$a = m\cdot\sqrt[3]{\frac{3}{2}\cdot\frac{N(1-\nu^2)}{E(A+B)}} \quad (8)$$

$$b = n\cdot\sqrt[3]{\frac{3}{2}\cdot\frac{N(1-\nu^2)}{E(A+B)}} \quad (9)$$

- หาพื้นที่สัมผัสของวงรี จากสมการ (10)

$$A_e = \pi\cdot a\cdot b \quad (10)$$

- หาค่า Normal Stresses พื้นที่สัมผัสของวงรีจากสมการ (11)

$$\sigma_\xi = \frac{3N}{2A_e}\cdot\sqrt{1-\left(\frac{\xi}{a}\right)^2-\left(\frac{\eta}{b}\right)^2} \quad (11)$$

- หาค่า Maximum normal stress จากสมการ (12)

$$\sigma_{\xi,max} = \frac{3N}{2A_e} \quad (12)$$

### 3.6 Kalker's linear theory

ทฤษฎีของ Kalker'linear theory [3] ได้กำหนดการหาค่า Creep forces โดยที่ค่า Creepage มีค่าน้อยจะได้ผลของค่า Creep force ที่ถูกต้อง ซึ่ง

สามารถคำนวณหาค่า Creep forces และ Spin moment จากสมการ (13),(14) และ(15)

$$F_\xi - -K_{11}\cdot v_\xi \tag{13}$$
$$F_\eta = -K_{22}\cdot v_\eta - K_{23}\cdot \phi \tag{14}$$
$$M_\phi = K_{23}\cdot v_\eta - K_{33}\cdot \phi \tag{15}$$

ค่า $K_{ij}$ คือ Creep coefficients ซึ่งถูกกำหนดการหาค่าด้วยความสัมพันธ์กับค่าแกนเอก (a) และแกนโท (b) ตามของทฤษฎีของ Hertz theory หรือสามารถขึ้นให้อยู่ในรูปเมตริกได้ดังสมาการ (16)

$$\begin{Bmatrix} F_\xi \\ F_\eta \\ M_\phi \end{Bmatrix} = -G\cdot ab\cdot \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & \sqrt{ab}c_{23} \\ 0 & -\sqrt{ab}c_{23} & ab^2 c_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_\xi \\ v_\eta \\ \phi \end{Bmatrix} \tag{16}$$

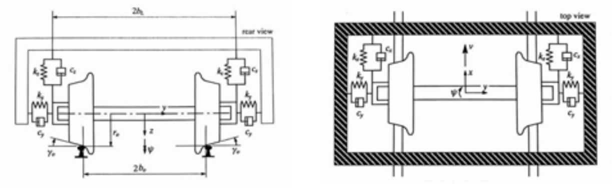
โดยที่ G คือค่า Shear modulus

$C_{ij}$คือค่า Kalker coefficients จากตาราง [3]

### 3.7 Lateral dynamic of a wheelset

การเคลื่อนที่ของระบบรถไฟมีความสับซ้อนอย่างมาก ซึ่งในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก เพื่อศึกษาพฤติกรรมและผลการตอบสนองของตัวรถ ดังนั้นจะศึกษาของระบบเพลาล้อเดี่ยว (wheelset) ซึ่งจะต่อเข้ากับเฟรมของตัวรถ แสดงในรูปที่ 12. [3] สมการการเคลื่อนที่จะเป็นแบบสองตัวแปรอิสระ (Two degree of freedom) [3] มาจากการพิสูจน์โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตัน สมการ (17)

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{Bmatrix} = [F_N] + [F_i] + [F_v] \tag{17}$$



รูปที่ 12. A simplified lateral dynamic model of a suspended wheelset

โดยที่ m คือ มวลเพลาล้อ (kg)

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเพลาล้อ (kg.m$^2$)

$F_N$ คือ แรงในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัส (N)

$F_i$ คือ แรงการต้านการสั่นระบบตัวรถ (N)

$F_v$ คือ แรงการต้านการเคลื่อนที่ (N)

y คือ ระยะเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างตัวรถ(m)

$\psi$ คือ ระยะเคลื่อนที่แบบหมุน (rad)

ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่ใน 2 สมการ [3] และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกได้ดังสมการ (18)

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\psi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c_y & 0 \\ 0 & 2b_L^2 c_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} + \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 2k_{22} & 2k_{23} \\ 0 & 2b_0^2 k_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_y + 2K(Q_0 - \frac{k_{23}}{r_0}) & -2k_{22} \\ \frac{2b_0 k_{11}\lambda}{r_0} & 2b_L^2 k_x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ \psi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{18}$$

โดยที่ $k_x,k_y$ คือค่านิจสปริง (N/m)

$c_x,c_y$ คือค่าแดมเปอร์ (Ns/m)

$Q_0$ คือน้ำหนักภาระโหลดต่อเพลาล้อ (N)

V คือความเร็วของตัวรถ (m/s)

$b_L$ คือระยะครึ่งหนึ่งของความกว้างระบบการสั่นสะเทือน (m)

$b_0$ คือระยะครึ่งหนึ่งของความกว้างจุดสัมผัสของล้อและราง (m)

K คือค่า Coefficient of contact angle difference (1/m)

$k_{11},k_{22},k_{23}$ คือค่า Kalker’s creepage coefficient (N,N,Nm)

### 3.8 ความเร็ววิกฤต (Critical speed)

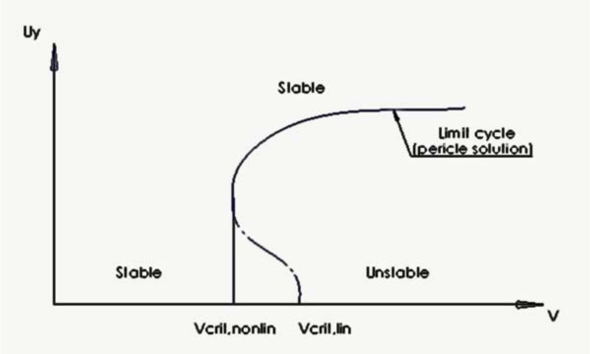
#### 3.8.1 สำหรับคอนทัวร์แบบไม่สึกหรอ

ผลการตอบสนองจะแกว่งตามเวลา โดยจะแกว่งแบบเชิงเส้น(linear system) สามารถพิจารณาค่า eigenvalue บนแกนส่วนจริง (Real part) และแกนส่วนจินตภาพ (imaginary part ) ที่อยู่บน Complex plane ว่ามีความเสถียรภาพหรือไม่ ถ้าค่า eigenvalue อยู่ทางด้านขวามากขึ้น จะทำให้เกิดการสั่นในแนวด้านข้างของตัวรถมากขึ้น

#### 3.8.2 สำหรับคอนทัวร์แบบสึกหรอ

จะไม่สามารถหาค่า Eigenvalues เนื่องจากเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้น(Nonlinear system) จึง

จำเป็นต้องใช้วิธีการดูจากผลการตอบสนองบนกราฟ (Simulation) การเคลื่อนที่ของตัวรถในแนวด้านข้างจึงต้องคำนึงถึงความเสถียรภาพเป็นหลัก (Stable) [3] โดยพิจารณาแอมพลิจูดการสั่นของตัวรถในแนวด้านข้างกับความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงรูปที่ 15. ค่าความเร็วน้อยที่สุดที่ทำให้เกิด limit cycle เรียกว่า ความเร็ววิกฤตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear critical speed)




รูปที่ 15. Limit cycle diagram of lateral amplitude of wheelset hunting as function of vehicle speed.

- สำหรับ V < $V_{crit,nonlin}$ ระบบจะมีเสถียรภาพ(Stable)
- สำหรับ $V_{crit,nonlin}$< V < $V_{crit,lin}$ ผลขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถ (Lateral displacement) ถ้าค่าเริ่มต้นต่ำกว่าเส้นประจะทำให้ไม่เกิดการสั่นที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าค่ามากกว่าเส้นประจะทำให้เกิด limit cycle ขึ้น
- สำหรับ V > $V_{crit,lin}$ ผลจะทำให้เกิด limit cycle ขึ้น โดยไม่ต้องคำนึงถึงค่าเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถ (Lateral displacement)

## 4. ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการศึกษา

4.1 ศึกษาและเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำการวิจัย

4.2 เขียนแบบวิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่สึกหรอและแบบสึกหรอ โดยใช้โปรแกรม Solidworks 2014

4.3 เขียนแบบชุดเพลาล้อและราง ใช้อัตราส่วนขนาดเท่ากับของจริง โดยใช้โปรแกรม Solidworks 2014

4.4 หาค่า Equivalent Conicity ($\lambda$) จากการเปลี่ยนแปลงรัศมีของล้อซ้าย-ขวาต่อระยะการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถ และวาดกราฟของการเปลี่ยนแปลงจากนั้นเขียนโปรแกรม Matlab R2014a

4.5 หาค่าแกนเอก (a), แกนโท (b) และหาพื้นที่สัมผัสที่ของวิฑูรย์คอนทัวร์กับราง BS100A ตามทฤษฎีของ Hertz

4.6 หาค่า Kalker coefficient,$k_{11}$,$k_{22}$ และ $k_{23}$ เพื่อที่จะหาแรงต้านการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถ (Creep force)

4.7 กำหนดตัวแปรที่เปลี่ยนค่าได้และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กรณีการทดลอง

| กรณีการศึกษาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของเพลาล้อรถไฟ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Unworn wheel profile | | | Worn wheel profile | | |
| กรณี 1. | น้ำหนักกดเพลาคงที่ 18 tons (Full load) | ความเร็ว (km/hr) | กรณี 3. | น้ำหนักกดเพลาคงที่ 18 tons (Full load) | ความเร็ว (km/hr) |
| | | 40 | | | 20 |
| | | 80 | | | 40 |
| | | 120 | | | 60 |
| กรณี 2. | ความเร็วคงที่ 80 km/hr | น้ำหนักกดเพลา (tons) | กรณี 4. | ความเร็วคงที่ 53 km/hr | น้ำหนักกดเพลา (tons) |
| | | 4.50 | | | 4.50 |
| | | 11.25 | | | 11.25 |
| | | 18.00 | | | 18.00 |

และหาค่าความเร็ววิกฤตของวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ

4.8 เขียนสมการการเคลื่อนที่ โดยใช้แปรแกรม Matlab Simulink R2014a

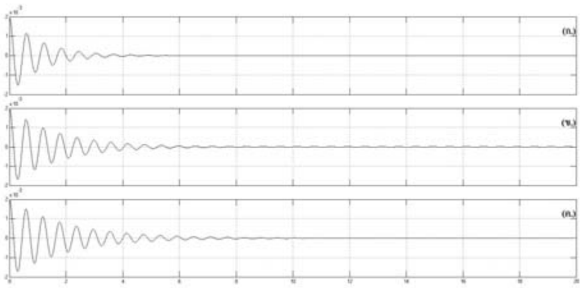
4.9 ทำการทดลองแบบจำลองตามที่กำหนดข้างต้น

## 5. ผลการทดลอง

### 5.1 วิฑูรย์คอนทัวร์ไม่สึกหรอ (Unworn Vidura Profile)

**กรณีที่ 1. น้ำหนักกดเพลาล้อเปลี่ยนแปลง**

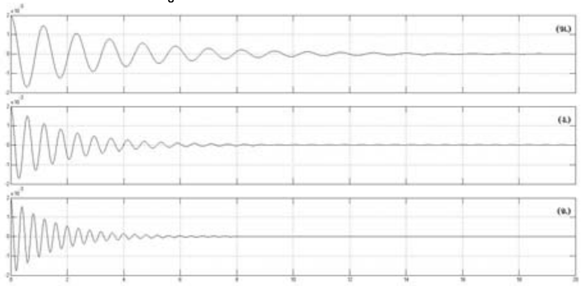
พฤติกรรมของชุดเพลาล้อในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง ซึ่งกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกดเพลาล้อ 4.5 ตัน(กราฟ ก.),11.25 ตัน(กราฟ ข.) และ 18 ตัน (กราฟ ค.) โดยที่มีความเร็วของตัวรถคงที่ คือ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีผลแนวโน้มใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการเข้าสู่สมดุล (Steady state) เนื่องจากน้ำหนักกดเพลาล้อที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า Kalker coefficient มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลโดยตรงต่อแรงต้านในแนวด้านข้างเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 13.



รูปที่ 13. ผลการตอบสนองของชุดเพลาล้อวิฑูรย์คอนทัวร์ ไม่สึกหรอ ที่มีเงื่อนไขค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถเป็นระยะ +2 มิลลิเมตร

**กรณีที่ 2. ความเร็วเปลี่ยนแปลง**

พฤติกรรมของชุดเพลาล้อในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้าง ซึ่งกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของตัวรถ 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กราฟ ฆ.), 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กราฟ ง.) และ 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กราฟ จ.) โดยที่มีน้ำหนักกดเพลาล้อคงที่ คือ 18 ตัน(Full load) มีผลแนวโน้มใช้เวลาน้อยลงในการเข้าสู่สมดุล (Steady state) เนื่องจากความเร็วการเคลื่อนที่ของตัวรถที่เพิ่มขึ้นทำให้ช่วยลดแรงต้านในแนวด้านข้างให้น้อยลง แสดงในรูปที่ 14.

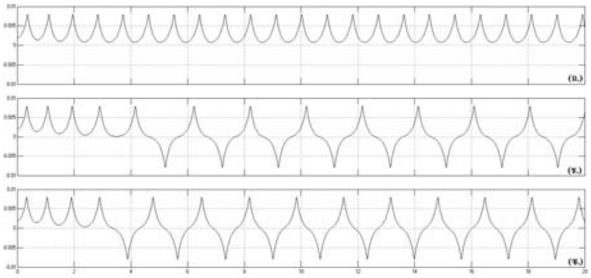


ภาพที่ 14. ผลการตอบสนองของชุดเพลาล้อวิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่สึกหรอ ที่มีเงื่อนไขค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถเป็นระยะ +2 มิลลิเมตร

**5.2 วิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ (Worn Vidura Profile)**

**กรณีที่ 3. น้ำหนักกดเพลาล้อเปลี่ยนแปลง**

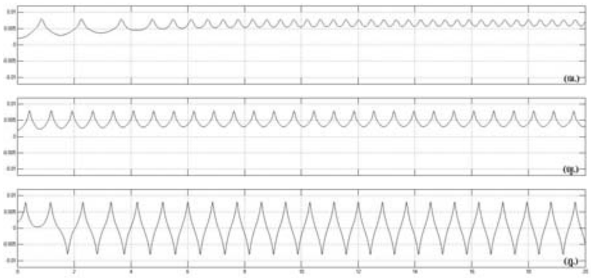
พฤติกรรมของชุดเพลาล้อในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างจะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกดเพลาล้อ 4.5 ตัน(กราฟ ฉ.), 11.25 ตัน(กราฟ ช.) และ 18 ตัน(กราฟ ซ.) โดยที่มีความเร็วของตัวรถคงที่ คือ 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องจากค่า Equivalent Conicity ($\lambda$) มีค่าเป็นลบ ซึ่งเกิดจากแบบวิฑูรย์คอนทัวร์มีการสึกหรอ หากน้ำหนักกดเพลาล้อเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างสูงขึ้นจนระยะเคลื่อนที่มากสุด ±8 มิลิเมตรแบบคงที่ (กราฟ ซ.) แสดงในรูปที่ 15.



ภาพที่ 15. ผลการตอบสนองของชุดเพลาล้อวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ ที่มีเงื่อนไขค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถเป็นระยะ +2 มิลลิเมตร

**กรณีที่ 2. ความเร็วเปลี่ยนแปลง**

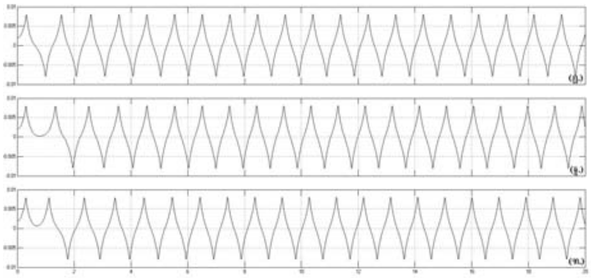
พฤติกรรมของชุดเพลาล้อในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างจะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของตัวรถ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กราฟ ฌ.), 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กราฟ ญ.) และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (กราฟ ฎ.) โดยที่มีน้ำหนักกดเพลาล้อคงที่ คือ 18 ตัน(Full load) จะทำให้เพลาล้อเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างกลับไปมา เนื่องจากค่า Equivalent Conicity ($\lambda$) มีค่าเป็นลบ ซึ่งเกิดจากแบบวิฑูรย์คอนทัวร์มีการสึกหรอ หากความเร็วของตัวรถเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ระยะในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างสูงขึ้นจนระยะเคลื่อนที่ ±8 มิลิเมตรแบบคงที่ (กราฟ ฎ.) แสดงในรูปที่ 16. เนื่องจากความเร็วการเคลื่อนที่ของตัวรถที่เพิ่มขึ้นทำให้ช่วยลดแรงต้านในแนวด้านข้างให้น้อยลง แต่ถ้าความเร็วที่สูงขึ้นไปเรื่อยๆ จะทำให้แอมพลิจูดการแกว่งเกิน ±8 มิลิเมตร และทำให้เกิดการแกว่งอย่างรุนแรงในแนวด้านข้างของตัวรถ



ภาพที่ 16. ผลการตอบสนองของชุดเพลาล้อวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ ที่มีเงื่อนไขค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถเป็นระยะ +2 มิลลิเมตร

**หาค่าความเร็ววิกฤตของวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ**

พฤติกรรมของชุดเพลาล้อในการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างจะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น(Nonlinear) ซึ่งกำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกดเพลาล้อ 4.5 ตัน (กราฟ ฎ.), 11.25 ตัน(กราฟ ฐ.) และ 18 ตัน(กราฟ ฑ.) โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของตัวรถจนมีค่าแอมพลิจูดการแกว่งคงที่และระยะการแกว่งมากที่สุดมีค่าไม่เกิน ±8 มิลิเมตร แสดงในรูปที่ 17 หากความเร็วเพิ่มขึ้นมากกว่านี้จะทำให้การแอมพลิจูดแกว่งเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ จนเกิดการแกว่งอย่างรุนแรงส่งผลทำให้ชุดเพลาล้อเลื่อนออกจากรางในที่สุด



รูปที่ 17. ผลการตอบสนองของชุดเพลาล้อวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ ที่มีเงื่อนไขค่าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของตัวรถเป็นระยะ +2 มิลิเมตร

## 6. สรุปผลการทดลอง

6.1 สำหรับการพิจารณาความเร็ววิกฤตของวิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่สึกหรอ (Unworn) จะละเว้นการพิจารณาค่าความเร็ววิกฤต เนื่องจากความเร็วสูงสุดที่ใช้งานได้อยู่ที่ 160 km/hr(ออกแบบ) แต่ความเร็วที่ใช้งานจริงอยู่ประมาณ 120-130 km/hr (สำหรับเส้นทางตรง) แต่จะการพิจารณาความเร็ววิฤตของการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อแบบวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ (Worn) กับรางชนิด BS100A ดังผลแสดงตารางที่ 2 ค่าความเร็ววิกฤตที่นำไปใช้งานได้ต้องมีค่าน้อยที่สุดไม่เกิน 58.5 km/hr

ตารางที่ 2 ความเร็ววิกฤตที่ No load, Half load และ Full load

| ความเร็ววิกฤตของวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ | | |
|---|---|---|
| Worn wheel profile | น้ำหนักกดเพลา (tons) | ความเร็ววิกฤต (km/hr) |
| No load | 4.50 | 60.0 |
| Half load | 11.25 | 58.8 |
| Full load | 18.00 | 58.5 |

6.2 สำหรับน้ำหนักกดเพลาล้อแบบ No load จะเห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้แอมพลิจูดการแกว่งเพิ่มขึ้นแต่จะแกว่งไม่เกิน ±8 มิลิเมตร และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกดเพลาล้อแบบ Half load ทำให้ค่าแอมพลิจูดแกว่งสูงขึ้นและการแกว่งจะไม่เกิน ±8 มิลิเมตร ส่งผลให้ค่าความเร็ววิกฤตมีค่าลดลง และสำหรับเพิ่มน้ำหนักกดแบบ full load จะทำให้แอมพลิจูดแกว่งสูงขึ้นและเพื่อไม่ให้มีการแกว่งเกินช่วง ±8 มิลิเมตร ค่าความเร็ววิกฤตจะมีค่าลดลงไปด้วย ความเร็ววิกฤตมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักกดเพลาล้อมากขึ้น ซึ่งเกิดจากคอนทัวร์ล้อสึกหรอ

6.3 วิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่มีสึกหรอการตอบสนองจะเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีการตอบสนองเข้าสู่สมดุลเร็วเนื่องจากแบบวิฑูรย์คอนทัวร์ล้อจะเป็นลักษณะเทเปอร์ค่าของ conicity จะเป็นบวก ซึ่งจะตอบสนองการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างรถได้ดีกว่าวิฑูรย์คอนทัวร์แบบสึกหรอ ที่ซึ่งเมื่อใช้งานล้อรถจักรไประยะหนึ่งจะทำให้คอนทัวร์สึกหรอไปเกิดรัศมีสัมผัสของล้อกับราง ค่าของconicity จะเป็นลบ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น อาจจะเคลื่อนด้านใดด้านหนึ่งแล้วเคลื่อนที่กลับไปกลับมาทำให้ระบบไม่มีการเข้าสู่สมดุลเหมือนดังเช่นวิฑูรย์คอนทัวร์แบบไม่มีการสึกหรอ

## 8. อ้างอิง

[1] SRT Mechanical Engineering Department (1962), Memo on Vidura Contour, State Railway of Thailand, Bangkok, Thailand

[2] JFE Steel Corporation, Rail Information, http://www.jfe-steel.com.jp/en/

[3] Andersen E., Berg M., and Sebastian S.(2014), Rail Vehicle Dynamics, Railway Group KTH, the Royal Institute of Technology, Stockholm, ISBN 9789175954202, Sweden

[4] Esveld C. (2001), Modern Railway Track 2nd Edition, ISBN 90800432433, the Netherland

[5] SRT Mechanical Engineering Department (2011), Technical Specification Document for the New CNC Wheel Lath, State Railway of Thailand, Bangkok, Thailand