
(ร่าง) มาตรฐานการทดสอบการสิ้นชะเทือนต่อ
ผู้โดยสารจากการขับเคลื่อนของรถขนส่งทางรางที่
ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่

สารบัญ

	หน้า
1. บทนำ	1
1.1. ขอบข่าย	1
2. มาตรฐานอ้างอิง	2
3. นิยามและสัญลักษณ์	2
3.1 นิยาม	2
3.2 สัญลักษณ์	3
3.3 ตัวห้อย	4
4. รายการเครื่องมือและอุปกรณ์	8
5. การเตรียมความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์	8
6. การเปรียบเทียบความถูกต้องและการตั้งค่าการตรวจวัดของเครื่องมือทดสอบ	9
6.1 เปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัด	9
6.2 ตั้งค่าการตรวจวัดของเครื่องมือวัด	10
6.3 ตั้งค่าการชักตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจวัด	12
7. คุณสมบัติการทดสอบ	12
7.1 ทั่วไป	12
7.2 การทดสอบสำหรับการสั่นสะเทือนภายในขบวนรถไฟ (interior vibration)	12
8. การตรวจผลการวัดคุณสมบัติ	12
9. การคำนวณผลการตรวจวัด	12
10. การจัดทำรายงานผล และสรุปผล	13
10.1 การรายงานค่าที่ได้จากการทดสอบ	13
10.2 การสรุปผล	13
10.3 เกณฑ์การยอมรับ	13
11. เอกสารอ้างอิง	14
ภาคผนวก ก การทดสอบสำหรับการสั่นสะเทือนภายในขบวนรถไฟ (interior vibration)	ก – 1
ภาคผนวก ข การคำนวณการสั่นสะเทือน	ข – 1
ภาคผนวก ค การประเมินผลกระทบด้านสุขภาพ	ค – 1
ภาคผนวก ง การประเมินผลกระทบด้านความสบายและความสามารถในการรับรู้	ง – 1

1. บทนำ

ปัจจุบันมีความต้องการใช้บริการรถไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเดินทาง จำนวนขบวนรถไฟฟ้าและระดับความเร็วในการให้บริการที่สูงขึ้นตามความต้องการส่งผลให้โครงสร้างทางเกิดการสั่นสะเทือนสูงขึ้นซึ่งสามารถรับรู้ได้ถึงการสั่นสะเทือนอย่างชัดเจนแม้ในขณะที่นั่งอยู่ในขบวนรถไฟฟ้า รวมถึงชุมชนบริเวณแนวเส้นทางรถไฟฟ้า

การสั่นสะเทือนที่เกิดจากรถขนส่งทางรางที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่ต่อผู้โดยสารและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่แบบหลายแกนซึ่งถ่ายทอดมาจากรางวิ่ง สู่ตัวรถไฟฟ้าและที่นั่ง การสั่นสะเทือนมักประกอบด้วยความถี่จำนวนมากที่เกิดขึ้นพร้อมกันในหลายทิศทางและมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา การรับรู้หรือการสัมผัสถึงการสั่นสะเทือนแบบทั่วทั้งร่างกายนั้น (whole-body vibration: WBV) ก่อให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายทั้งในด้านการกระจายตัวของการสั่นสะเทือนและแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงทั่วทั้งร่างกายมีโอกาสส่งผลให้เกิดความไม่สบายหรือความรำคาญ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานและสุขภาพ ด้วยเหตุนี้ จึงได้จัดทำมาตรฐานการทดสอบการสั่นสะเทือนต่อผู้โดยสารจากการขับเคลื่อนของรถขนส่งทางรางที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่วิธีการทดสอบความสั่นสะเทือนสำหรับระบบขับเคลื่อนตัวรถไฟฟ้า ซึ่งได้อ้างอิงจากมาตรฐานสากล โดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำมาใช้ในประเทศไทย รวมถึงมาตรฐานของประเทศไทยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ควบคุมระดับการสั่นสะเทือนอยู่ภายใต้เกณฑ์ความปลอดภัย ทำให้ผู้โดยสารและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานบนขบวนรถไฟฟ้ามีความปลอดภัย

1.1. ขอบข่าย

- 1.1.1 มาตรฐานนี้ครอบคลุมถึงข้อกำหนดการทดสอบการสั่นสะเทือนที่เกิดต่อผู้โดยสารจากการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าบนรางวิ่งของรถขนส่งทางรางที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่สำหรับใช้งานในเมืองและระหว่างเมือง
- 1.1.2 มาตรฐานนี้ครอบคลุมถึงข้อกำหนดการทดสอบสำหรับการสั่นสะเทือนภายในขบวนรถไฟฟ้า (interior vibration)
- 1.1.3 มาตรฐานนี้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์ลักษณะการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพ (health) และความสบายของร่างกายในการใช้บริการ (comfort)
- 1.1.4 การปฏิบัติตามมาตรฐานนี้ไม่ได้เป็นการรับรองความปลอดภัย ความปลอดภัยจากการใช้มาตรฐานนี้เป็นความรับผิดชอบของผู้ใช้มาตรฐาน

2. มาตรฐานอ้างอิง

- 2.1 ISO 2041 Mechanical vibration, shock and condition monitoring — Vocabulary
 - 2.2 ISO 5805 Mechanical vibration and shock — Human exposure — Vocabulary
 - 2.3 ISO 8041-1 Human response to vibration — Measuring instrumentation – Part 1: General purpose vibration meters
 - 2.4 IEC 61260-1 Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications
 - 2.5 IEC 61260-2 Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 2: Pattern-evaluation tests
 - 2.6 IEC 61260-3 Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 3: Periodic tests
 - 2.7 ISO 2631-4 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport systems
 - 2.8 ISO 16063-21, Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer
- มาตรฐานอ้างอิงในมาตรฐานฉบับนี้ให้ใช้ฉบับล่าสุด แต่ทั้งนี้ต้องไม่ขัดแย้งกับมาตรฐานฉบับนี้

3. นิยามและสัญลักษณ์

3.1 นิยาม

“การเทียบมาตรฐาน” (calibration) หมายถึง การปฏิบัติการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องมือวัดที่ไม่รู้ค่าความถูกต้องกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์มาตรฐานที่รู้ค่าความถูกต้องเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกันและรายงานผล มีการควบคุมสถานะแวดล้อมให้เหมาะสมกับการสอบเทียบ เครื่องมือวัดแต่ละรายการกระทำโดยเจ้าหน้าที่ภายในหรือภายนอกของห้องปฏิบัติการที่มีความรู้ ประสบการณ์ และผ่านการอบรมที่เกี่ยวกับการสอบเทียบเครื่องมือวัดแต่ละรายการ

“การปรับเทียบ” (adjusting calibration) หมายถึง การปรับแต่งเครื่องมือวัด ในกรณีที่ผลการตรวจวัดผิดไปจากเกณฑ์การยอมรับที่กำหนดเพื่อสามารถรับประกันความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดได้จากการปรับเทียบตามมาตรฐานการวัด

“การสอบย้อนกลับได้” (traceability) หมายถึง การสอบเทียบเครื่องมือวัดอย่างต่อเนื่องจากเครื่องมือวัดของผู้ใช้งานย้อนกลับไปยังมาตรฐานที่ยอมรับ ซึ่งเป็นมาตรฐานระหว่างประเทศหรือ

มาตรฐานแห่งชาติ รวมถึงค่าในแต่ละขั้นตอนของความไม่แน่นอนของการวัดที่สามารถสอบกลับได้ จะต้องคำนวณตามวิธีที่กำหนดและรายงานค่า เพื่อให้สามารถคำนวณความไม่แน่นอนรวมของทุกขั้นตอนได้

“การสั่นพ้อง” (resonance) หมายถึง ปรากฏการณ์ที่แอมพลิจูดของการสั่นของระบบเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก เมื่อความถี่ของแรงกระตุ้นภายนอกมีค่าเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของระบบนั้น

“การสั่นสะเทือนอิสระ” (free vibration) หมายถึง การสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเปลี่ยนระยะกระจัดเริ่มต้น และ/หรือ การเปลี่ยนความเร็วเริ่มต้น เช่น การเปลี่ยนตำแหน่งของลูกตุ้มนาฬิกาที่เดิมอยู่นิ่งในแนวดิ่ง

“การสั่นสะเทือนบังคับ” (forced vibration) หมายถึง ลักษณะของการสั่นสะเทือนที่พบโดยทั่วไปในโครงสร้างทาง การสั่นสะเทือนประเภทนี้เกิดจากการป้อนแรงหรือพลังงานอย่างต่อเนื่อง

“ความถี่ธรรมชาติ” (natural frequency) หมายถึง ความถี่ของการสั่นอิสระของระบบ หลังจาก que ระบบถูกกระทำให้เคลื่อนออกจากตำแหน่งสมดุล แล้วปล่อยให้เคลื่อนที่โดยไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

“ความเร่งการสั่นสะเทือน” (vibration acceleration) หมายถึง ปริมาณการสั่นสะเทือนที่เป็นองค์ประกอบของความเร่งตามแนวแกนที่ทำการวัดเป็นไปตามมาตรฐาน

3.2 สัญลักษณ์

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์

(ที่มา: ISO 2631-1)

สัญลักษณ์	ความหมาย
a	อัตราเร่งของการสั่นสะเทือน (vibration acceleration) อัตราเร่งเชิงแปลง (translational acceleration) จะถูกระบุในหน่วย m/s^2 โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root-Mean-Square: RMS) นอกเสียจากจะมีการระบุเอาไว้เป็นแบบอื่น
r	อัตราเร่งเชิงหมุน (rotational acceleration) จะถูกระบุในหน่วยเรเดียนต่อวินาทีกำลังสอง (rad/s^2) โดยค่าดังกล่าวจะอยู่ในรูปแบบค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root-Mean-Square: RMS) นอกเสียจากจะมีการระบุเอาไว้เป็นแบบอื่น
$H(p)$	ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) หรืออัตราขยาย (gain) สำหรับฟังก์ชันที่มีการแสดงในลักษณะความถี่เชิงมุมจินตภาพ (imaginary angular frequency) หรือความถี่เชิงซ้อน (complex frequency)
$p=j2\pi f$	ความถี่เชิงมุมจินตภาพ (imaginary angular frequency)
W	ค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ (frequency weighting)

3.3 ตัวห้อย

ตารางที่ 2 ตัวห้อย

(ที่มา: ISO 2631-1)

ตัวห้อย (ISO 2631-1)	ความหมาย
c, d, e, f, j, k	กราฟค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ต่าง ๆ แนะนำสำหรับการประเมินผลที่อ้างอิงกับด้านสุขภาพ ความสะดวกสบาย ความสามารถในการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนและการเมารถ เมาเรือ (motion sickness) (ดูได้ที่ตารางที่ 1 และตารางที่ 2)
w	อัตราเร่งแบบมีการถ่วงน้ำหนักความถี่ (frequency-weighted acceleration)
x, y, z	ทิศทางของการสั่นสะเทือนเชิงแปลง (translational vibration) หรือการสั่นสะเทือนเชิงเส้นตรง (rectilinear vibration)
v	ผลรวมเวกเตอร์ของอัตราเร่งแบบมีการถ่วงน้ำหนักทั้งหมดทั้งในแกน x, y และ z

ตารางที่ 3 แนวทางสำหรับการใช้กราฟค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ต่าง ๆ สำหรับการถ่วงน้ำหนักส่วนใหญ่

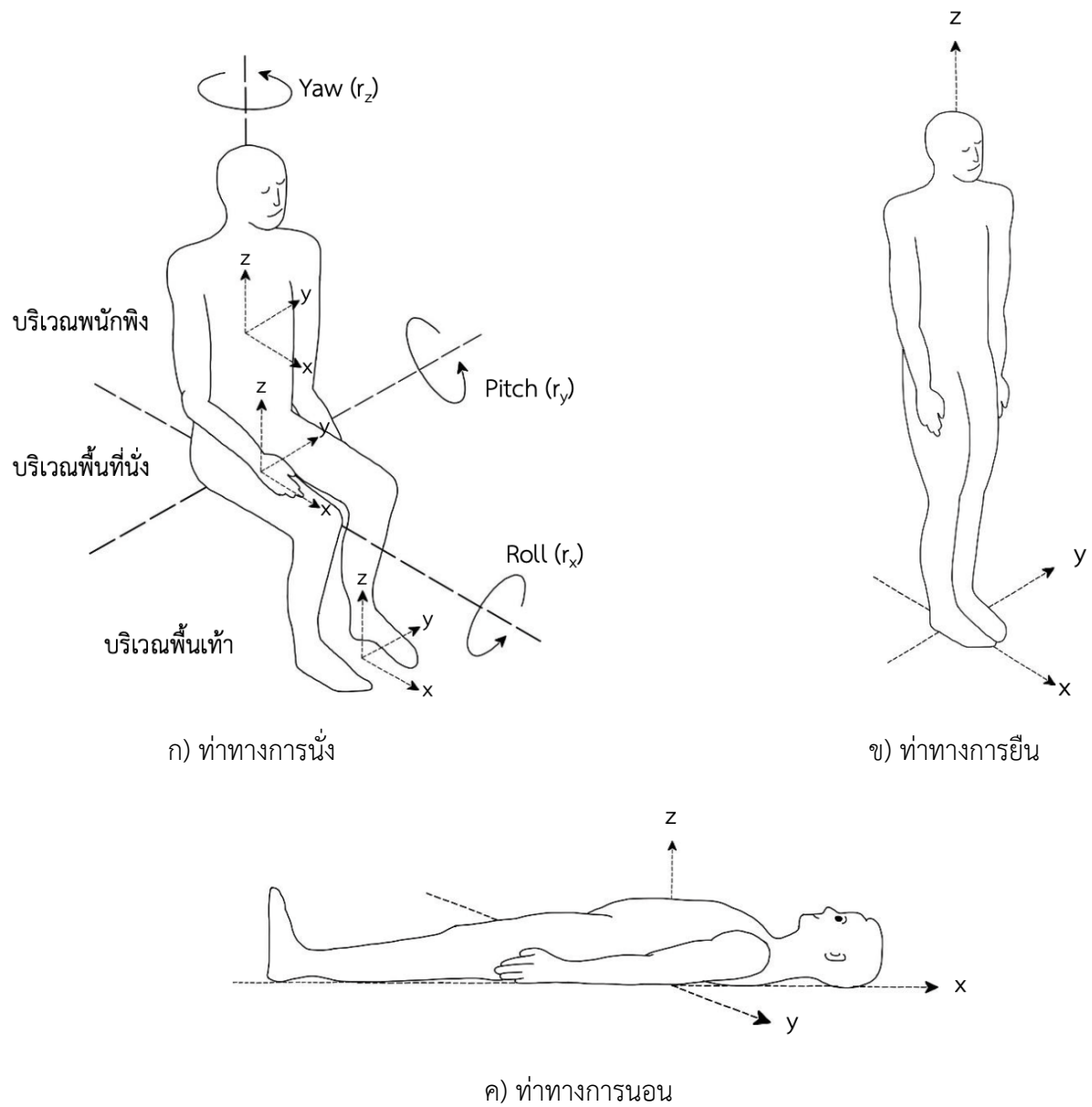
(ที่มา: ISO 2631-1)

ค่าถ่วงน้ำหนัก ความถี่ (frequency weighting)	สุขภาพ (health)	ความสบาย (comfort)	ความสามารถใน การรับรู้ (perception)	ความวิงเวียน (motion sickness)
W_k	แกน z , พื้นผิวที่ นั่ง	แกน z , พื้นผิวที่นั่ง แกน z , ท่าทางการ ยืน นอนราบใน แนวตั้ง (ยกเว้น บริเวณศีรษะ) แกน x, y, z , บริเวณพื้นเท้า (ท่าทางการนั่ง)	แกน z , พื้นผิวที่ นั่ง แกน z , ท่าทาง การยืน นอนราบ ในแนวตั้ง (ยกเว้น บริเวณศีรษะ)	-
W_d	แกน z , พื้นผิวที่ นั่ง แกน y , พื้นผิวที่ นั่ง	แกน x , พื้นผิวที่นั่ง แกน y , พื้นผิวที่นั่ง	แกน x , พื้นผิวที่ นั่ง แกน y , พื้นผิวที่ นั่ง	-

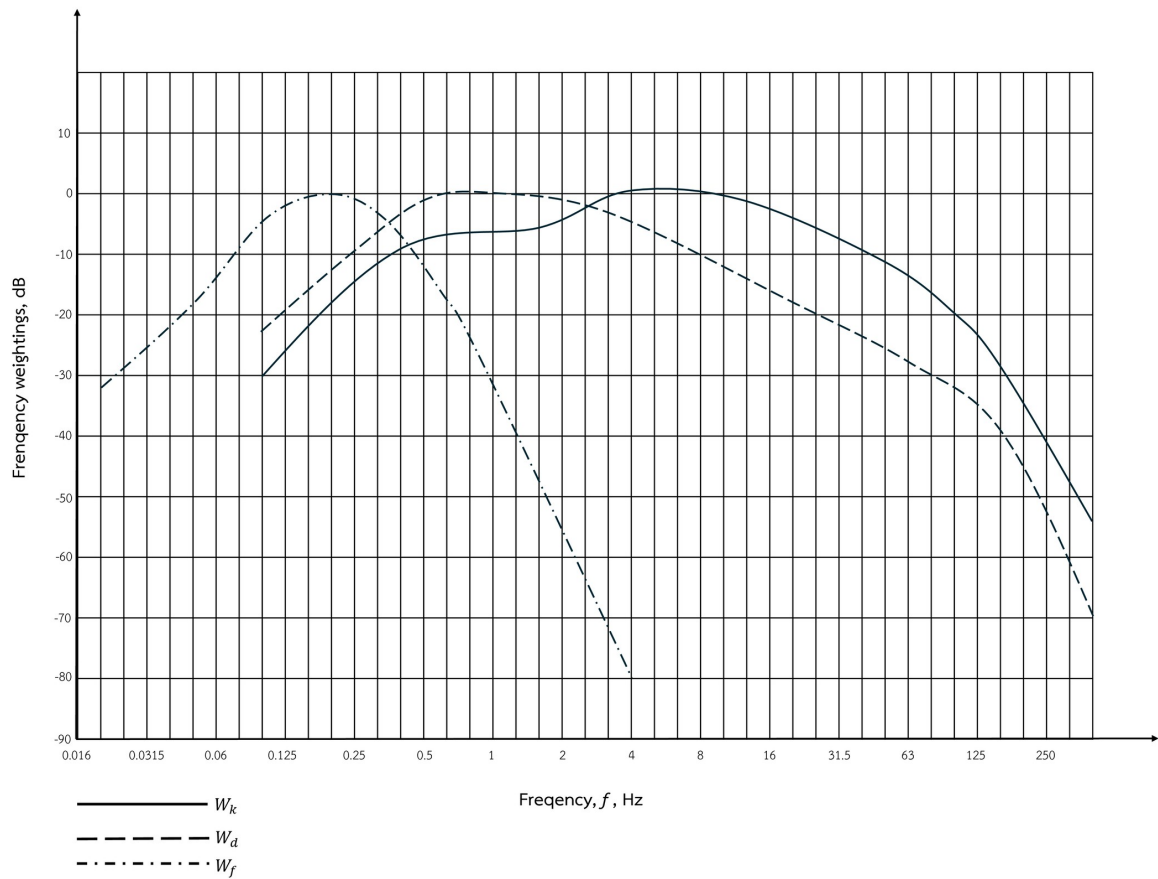
ค่าถ่วงน้ำหนัก ความถี่ (frequency weighting)	สุขภาพ (health)	ความสบาย (comfort)	ความสามารถใน การรับรู้ (perception)	ความวิงเวียน (motion sickness)
		แกน x, y, ทำทาง การย่น นอนราบใน แนวนอน แกน y, z, บริเวณ พนักพิงที่นั่ง	แกน x, y, ทำทาง การย่น นอนราบ ในแนวนอน	
W_f	-	-	-	แนวตั้ง

ตารางที่ 4 แนวทางการใช้กราฟค่าถ่วงน้ำหนักความถี่ต่าง ๆ สำหรับการถ่วงน้ำหนักแบบอื่น
(ที่มา: ISO 2631-1)

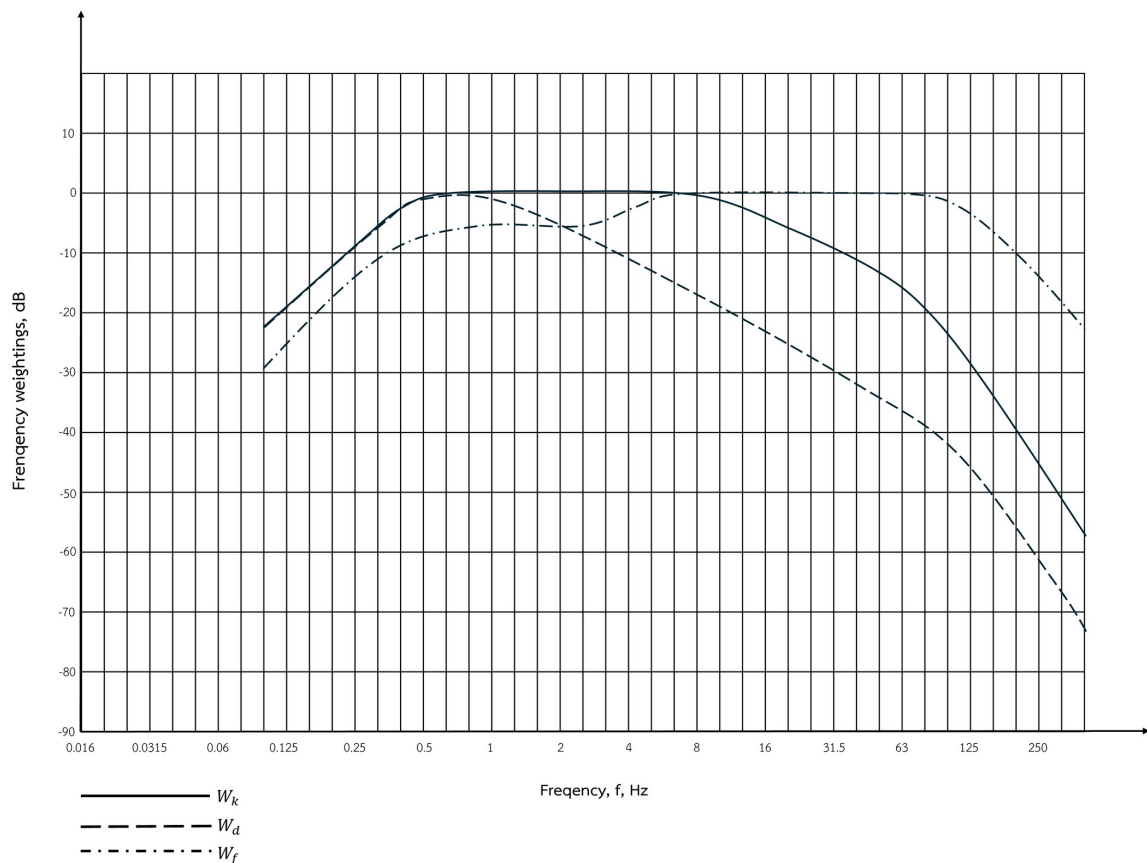
ค่าถ่วงน้ำหนัก ความถี่ (frequency weighting)	สุขภาพ (health)	ความสบาย (comfort)	ความสามารถใน การรับรู้ (perception)	ความวิงเวียน (motion sickness)
W_c	แกน x, บริเวณ พนักพิงที่นั่ง	แกน x, บริเวณ พนักพิงที่นั่ง	แกน x, บริเวณ พนักพิงที่นั่ง	-
W_e	-	แกน r_x, r_y, r_z , บริเวณพื้นที่นั่ง	แกน r_x, r_y, r_z , บริเวณพื้นที่นั่ง	-
W_j	-	นอนราบในแนวตั้ง (เฉพาะบริเวณ ศีรษะ)	นอนราบใน แนวตั้ง (เฉพาะบริเวณ ศีรษะ)	-



รูปที่ 1 แกนหมุนพื้นฐานในร่างกายมนุษย์
(ที่มา: ISO 2631-1)



รูปที่ 2 กราฟค่าถ่วงน้ำหนักความถี่สำหรับการถ่วงน้ำหนักส่วนใหญ่
(ที่มา: ISO 2631-1)



รูปที่ 3 กราฟค่าถ่วงน้ำหนักความถี่สำหรับการถ่วงน้ำหนักแบบอื่น
(ที่มา: ISO 2631-1)

4. รายการเครื่องมือและอุปกรณ์

- 4.1 หัววัดแรงสั่นสะเทือน (vibration transducer)
- 4.2 ส่วนประมวลผลสัญญาณ (signal processor)
- 4.3 เครื่องสอบเทียบการสั่นสะเทือน (vibration calibrator)
- 4.4 เครื่องระบุตำแหน่ง (global positioning system)

5. เตรียมความพร้อมของเครื่องมือและอุปกรณ์

- (1) ต้องเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือให้พร้อมก่อนเริ่มการทดสอบ โดยให้ปฏิบัติตามคำแนะนำของผู้ผลิตเครื่องมือวัดและอุปกรณ์อย่างเคร่งครัด รวมถึงเครื่องมือวัดที่ต้องใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบที่จะต้องมีการสอบเทียบอยู่เสมอ

- (2) ก่อนทำการทดสอบใด ๆ เครื่องมือจะต้องได้รับแหล่งจ่ายไฟไม่เกินขีดจำกัดการทำงานที่ระบุโดยผู้ผลิต เครื่องมือ หัววัด และเครื่องสอบเทียบการสันสะท้อนภาคสนาม จะต้องได้รับการตรวจสอบด้วยสายตาและการทำงานของส่วนควบคุมทั้งหมดเพื่อให้แน่ใจว่าทำงานได้ตามปกติ
- (3) ต้องปฏิบัติตามขั้นตอนที่ระบุในเอกสารประกอบเครื่องมือเพื่อกำหนดค่าความไวของการสันสะท้อนของเครื่องมือที่ความถี่ในการตรวจสอบการสอบเทียบ

6. การเปรียบเทียบความถูกต้องและการตั้งค่าการตรวจวัดของเครื่องมือทดสอบ

6.1 เปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องมือวัด

อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบ การสอบเทียบ และการชักตัวอย่างจะต้องสามารถแสดงได้ถึงความแม่นยำในระดับที่จำเป็นและต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบและ/หรือการสอบเทียบที่เกี่ยวข้อง โปรแกรมการสอบเทียบจะถูกกำหนดขึ้นสำหรับเครื่องมือวัดหลักซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อผลการวัด ก่อนนำไปใช้งาน อุปกรณ์จะต้องถูกสอบเทียบหรือตรวจสอบเพื่อให้แน่ใจว่าตรงตามข้อกำหนดของห้องปฏิบัติการและสอดคล้องกับข้อกำหนดตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ในการสอบเทียบ เครื่องมือวัดจะถูกรวบรวมและตรวจสอบคุณสมบัติโดยห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองคุณภาพ ISO/IEC 17025 ในหัวข้อที่ทำการสอบเทียบ และสามารถสอบย้อนกลับได้ไปยังหน่วยงานที่ให้บริการสอบเทียบ

การสอบเทียบดำเนินการด้วยวิธีการที่เป็นไปตามมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับในระดับสากล โดยการสอบเทียบหัววัดแรงสันสะท้อนดำเนินการตาม ISO 16063-21

การสอบเทียบของเครื่องมือวัดตามมาตรฐานจะต้องดำเนินการตามคำแนะนำของผู้ผลิต

ใบรับรองการสอบเทียบ (calibration certificate) จะต้องมีการระบุข้อมูลผลการสอบเทียบดังนี้

- (1) เงื่อนไขที่ทำการสอบเทียบที่มีอิทธิพลต่อผลการวัด เช่น อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์
- (2) ความไม่แน่นอนของการวัด

ใบรับรองผลการสอบเทียบ ที่ออกโดยห้องปฏิบัติการภายหลังดำเนินการแล้วเสร็จ เป็นใบรายงานผลการวัดของเครื่องมือวัดนั้น ๆ ที่ผู้ใช้งานสามารถนำมาพิจารณาว่าเครื่องมือมีสมรรถนะที่ยังสามารถทำงานได้ตามปกติ ผลการวัดทุกหัวข้อจะต้องไม่เกินเกณฑ์ของผู้ผลิต

6.2 ตั้งค่าการตรวจวัดของเครื่องมือวัด

6.2.1 ทั่วไป

ทำการปรับตั้งช่วงการใช้งานของเครื่องมือวัดให้มีความเหมาะสมกับการทดสอบ ซึ่งข้อมูลเพิ่มเติมอาจจะได้จากเอกสารของผู้ผลิตเครื่องมือวัด โดยการตั้งค่าเครื่องมือวัดควรจะครอบคลุมเรื่องการเชื่อมต่อเครื่องมือวัดและเครื่องวิเคราะห์อย่างถูกต้องเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องและเชื่อถือได้

ข้อผิดพลาดในการบ่งชี้ค่าความเร่งอ้างอิงที่ความถี่อ้างอิงจะต้องพิจารณาจากความแตกต่างระหว่างค่าการสั่นสะเทือนที่แสดงโดยเครื่องมือและค่าการสั่นสะเทือนที่สอดคล้องกันที่วัดโดยหัววัดการสั่นสะเทือนอ้างอิงที่ผ่านการสอบเทียบอย่างเหมาะสมที่ตำแหน่งวัดเดียวกัน

จะต้องได้รับการวัดข้อผิดพลาดอย่างน้อยจำนวนสามครั้ง สำหรับการวัดแต่ละครั้งช่วงเวลาไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ในเอกสารประกอบเครื่องมือ ซึ่งประกอบด้วยเวลาในการรอให้เครื่องมือเข้าสู่สภาวะพร้อมใช้งานก่อนเริ่มทำการวัด ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุดของการวัดทั้งสามครั้งต้องไม่เกิน 3%

6.2.2 ทิศทางการวัด

(1) การสั่นสะเทือนจะต้องถูกวัดโดยอิงจากระบบพิกัดจากจุดกำเนิดการสั่นสะเทือนเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ โดยระบบพิกัดพื้นฐานที่เกี่ยวข้องเป็นไปตามรูปที่ 1

(2) หากหัววัดแรงสั่นสะเทือนไม่สามารถติดตั้งอย่างแม่นยำตามแนวแกนพื้นฐานได้ สามารถมีคลาดเคลื่อนจากแกนที่เลือกไม่เกิน 15° ในส่วนของท่าทางการนั่งของมนุษย์โดยที่นั้นมีความลาดเอียงจะต้องอ้างอิงจากแกนของร่างกายและแกน z ไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวตั้ง

(3) หัววัดแรงสั่นสะเทือนจะต้องติดตั้งในแนวตั้งฉากกับบริเวณที่จะทำการตรวจวัดหรือติดตั้งให้ใกล้เคียงมากที่สุด

6.2.3 ตำแหน่งการวัด

(1) หัววัดแรงสั่นสะเทือนจะต้องอยู่บริเวณที่สามารถรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนที่จุดสัมผัสระหว่างร่างกายมนุษย์กับแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือน

(2) การสั่นสะเทือนที่ส่งมายังร่างกาย จะต้องถูกวัด ณ พื้นผิวที่อยู่ระหว่างร่างกายมนุษย์กับพื้นผิวที่มีการสั่นสะเทือน

(3) พื้นผิวหลักในการสัมผัสกันระหว่างร่างกายมนุษย์กับพื้นผิวที่มีการสั่นสะเทือนอาจจะไม่ได้มีการระบุได้โดยตรง โดยจะใช้พื้นที่สำหรับการนั่ง ได้แก่ บริเวณพนักพิง และบริเวณพื้นวางเท้าเป็นหลัก การวัดบริเวณพื้นที่นั้นจะต้องทำโดยอยู่บริเวณด้านล่างของกระดูกก้นกบ การวัด

บริเวณพนักพิงจะต้องทำโดยอยู่บริเวณที่รับแรงของร่างกายเป็นหลัก การวัดบริเวณพื้นเท้าจะต้องทำโดยอยู่บริเวณพื้นผิวรับแรงส่วนใหญ่ที่เท้า สำหรับท่านอนราบ ให้คำนึงถึงพื้นผิวที่รับแรงบริเวณกระดูกเชิงกราน หลัง และศีรษะ จะต้องมีการระบุถึงตำแหน่งในการวัดในรายงานเสมอ

หมายเหตุ

(1) บริเวณที่การวัดโดยตรงไม่สามารถกระทำได้ การสั่นสะเทือนจะต้องถูกวัด ณ บริเวณที่เป็นของแข็งไม่ว่าจะเป็นรถไฟหรือโครงสร้างอาคาร การประเมินผลของข้อมูลในส่วนของการตอบสนองของมนุษย์จะต้องมีการคำนวณเพิ่มเติม และต้องมีความรู้ทางด้านพลศาสตร์โครงสร้าง (structure dynamic) ของระบบที่ได้รับการประเมิน

(2) การวัดบริเวณพนักพิงมักจะทำโดยส่วนที่มีการสัมผัสกับร่างกายมนุษย์ ในกรณีที่วัดแบบนี้ได้ยากนั้น การวัดสามารถทำได้โดยวัดบริเวณโครงของที่นั่งบริเวณด้านหลังของเบาะพิงหลังได้ การวัดในลักษณะนี้จะต้องมีการชดเชยในส่วนของการคลาดเคลื่อนจากการสั่นสะเทือนที่ผ่านเบาะพิงหลังด้วย

(3) การวัดการสั่นสะเทือนระหว่างร่างกายกับพื้นผิวของแข็ง สามารถวัดจากบริเวณพื้นผิวรับแรงใกล้กับบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างร่างกายกับพื้นผิวนั้น ๆ ได้ โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในระยะ 10 cm จากบริเวณตรงกลางของพื้นผิวที่มีการสัมผัส

(4) การสั่นสะเทือนที่ส่งมายังร่างกายจากวัสดุที่ไม่มีความแข็ง หรือวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เช่น เบาะพิงหลังหรือโซฟา จะต้องได้รับการวัดค่าด้วยหัววัดแรงสั่นสะเทือนที่แทรกอยู่ระหว่างมนุษย์กับบริเวณหลักที่มีการสัมผัสของพื้นผิว การวัดจะต้องกระทำโดยจะต้องติดตั้งหัววัดแรงสั่นสะเทือนอย่างเหมาะสมมั่นคง โดยบริเวณที่ติดตั้งจะต้องไม่ส่งผลกระทบกับการกระจายแรงกดที่กระทำกับพื้นผิวของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น

6.2.4 ระยะเวลาการวัด

(1) ช่วงระยะเวลาในการวัดนั้นจะต้องเพียงพอในการจัดทำเป็นค่าทางสถิติที่แม่นยำอย่างเหมาะสม และจะต้องมั่นใจว่าการสั่นสะเทือนที่ได้รับการทดสอบนี้สามารถสัมผัสหรือรับรู้ได้โดยทั่วไป ระยะเวลาในการวัดค่าจะต้องมีการบันทึกในรายงาน

(2) กรณีการสัมผัสถึงการสั่นสะเทือนประกอบด้วยหลากหลายลักษณะตามช่วงเวลา การวิเคราะห์อาจจัดทำในหลายช่วงเวลา

6.3 ตั้งค่าการชกตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจวัด

(1) ห้องปฏิบัติการทดสอบต้องมีแผนการชกตัวอย่างและขั้นตอนการชกตัวอย่างเมื่อทำการชกตัวอย่างของตัวอย่างที่ทดสอบหรือสอบเทียบ แผนการชกตัวอย่างจะต้องยึดตามวิธีการทางสถิติที่เหมาะสม กระบวนการชกตัวอย่างจะต้องระบุปัจจัยที่ต้องควบคุมเพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดสอบและการสอบเทียบมีความถูกต้อง

(2) ในกรณีที่ต้องการหาค่าการเบี่ยงเบน เพิ่มเติม หรือยกเว้นจากขั้นตอนการชกตัวอย่างที่เป็นเอกสาร จะต้องบันทึกรายละเอียดเหล่านี้พร้อมข้อมูลการชกตัวอย่างที่เหมาะสม และจะต้องรวมอยู่ในเอกสารทั้งหมดที่มีผลการทดสอบและ/หรือผลการสอบเทียบ และจะต้องแจ้งให้บุคลากรที่เกี่ยวข้องทราบ

(3) ห้องปฏิบัติการทดสอบต้องมีขั้นตอนการบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้องและการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการชกตัวอย่างซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการทดสอบหรือการสอบเทียบ ข้อมูลที่ถูกรวบรวมเหล่านี้จะต้องรวมขั้นตอนการชกตัวอย่างที่ใช้ การระบุตัวอย่างที่ทดสอบ สภาพแวดล้อม และแผนผังแสดงสถานที่

ทั้งนี้ การปรับตั้งค่าการชกตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับแต่ละการทดสอบโดยให้สามารถแสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบที่เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับ

7 คุณสมบัติการทดสอบ

การใช้มาตรฐานฉบับนี้ในการทดสอบและประเมินผลให้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

7.1 ทั่วไป

ผู้ผลิตเตรียมเอกสารแบบรายละเอียดโครงสร้างและขนาดภายนอกและภายในระบบขับเคลื่อนตัวรถไฟ

7.2 การทดสอบสำหรับการสั่นสะเทือนภายในขบวนรถไฟ (interior vibration)

7.2.1 ขั้นตอนการทดสอบให้ดำเนินการตามที่ระบุในภาคผนวก ก

7.2.2 ค่าที่อ่านได้จะต้องต่ำกว่าขีดจำกัดตามที่ระบุในหัวข้อ 10.3

8 การตรวจผลการวัดคุณสมบัติ

การตรวจผลการวัดให้อ้างอิงกับขีดจำกัดและเกณฑ์การยอมรับที่ใช้ในการทดสอบ

9 การคำนวณผลการตรวจวัด

การคำนวณผลการตรวจวัดหากมีความจำเป็นในบางกรณีทดสอบให้ทำการบันทึกในรายงานการทดสอบ

10 การจัดทำรายงานผล และสรุปผล

รายงานการทดสอบให้เป็นไปตามรูปแบบของห้องปฏิบัติการทดสอบ โดยจะมีรายละเอียดขั้นต่ำดังต่อไปนี้

- (1) รายละเอียดตัวอย่างที่ทำการทดสอบ
- (2) สถานที่ เวลาที่ทำการทดสอบ และสภาพแวดล้อม (อุณหภูมิ ความเร็วลม ความชื้น ปริมาณฝน)
- (3) ผู้ทดสอบ (ระบุข้อมูลรายละเอียด เช่น ชื่อผู้ทดสอบ ตำแหน่ง)
- (4) เครื่องมือที่ใช้ทดสอบและเอกสารยืนยันการสอบเทียบ
- (5) ข้อกำหนดการทดสอบ
- (6) ขั้นตอนการติดตั้งและทดสอบ
- (7) ผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ
- (8) ภาพถ่ายการทดสอบ

10.1 การรายงานค่าที่ได้จากการทดสอบ

การรายงานค่าที่ได้จากการทดสอบจะแสดงค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดและระบุสถานะของผลการทดสอบเป็น ผ่าน (pass) หรือ ไม่ผ่าน (fail) ทุกหัวข้อการทดสอบ

10.2 การสรุปผล

ทำการสรุปผลที่ได้จากการทดสอบและวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อการทดสอบที่ไม่ผ่าน เช่น การระบุสาเหตุที่เป็นไปได้ และการแนะนำมาตรการแก้ไข

10.3 เกณฑ์การยอมรับ

เป็นไปตามที่ระบุในแต่ละหัวข้อการทดสอบในภาคผนวก โดยสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3 เกณฑ์การยอมรับการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพและความสะดวกสบายในการใช้บริการ
(ที่มา: ISO 2631-1)

หัวข้อ	เกณฑ์	รายละเอียด
การสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพ (health)	$A(8) \leq 0.5 \text{ m/s}^2$	การได้รับการสั่นสะเทือนต่อวัน
ความสบายในการใช้บริการ (comfort)	$a_v < 0.315 \text{ m/s}^2$	ไม่รู้สึกไม่สบาย
	$0.315 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 0.63 \text{ m/s}^2$	ไม่สบายเล็กน้อย
	$0.5 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 1 \text{ m/s}^2$	ค่อนข้างไม่สบาย
	$0.8 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 1.6 \text{ m/s}^2$	ไม่สบาย
	$1.25 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 2.5 \text{ m/s}^2$	ไม่สบายมาก
	$a_v > 2 \text{ m/s}^2$	ไม่สบายมากที่สุด

หมายเหตุ $A(8)$ คือ ค่าการสั่นสะเทือนถ่วงน้ำหนัก (weighted RMS acceleration) เฉลี่ยในช่วง 8 ชั่วโมงที่ได้รับการสั่นสะเทือน

a_v คือ ค่าอัตราเร่งเชิงถ่วงน้ำหนักรวมทั้งหมด (weighted total RMS acceleration)

11 เอกสารอ้างอิง

International Organization for Standardization. (1997). ISO 2631-1. Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements.

ภาคผนวก ก

การทดสอบสำหรับการสั่นสะเทือนภายในขบวนรถไฟ (interior vibration)

1. วัตถุประสงค์การทดสอบ

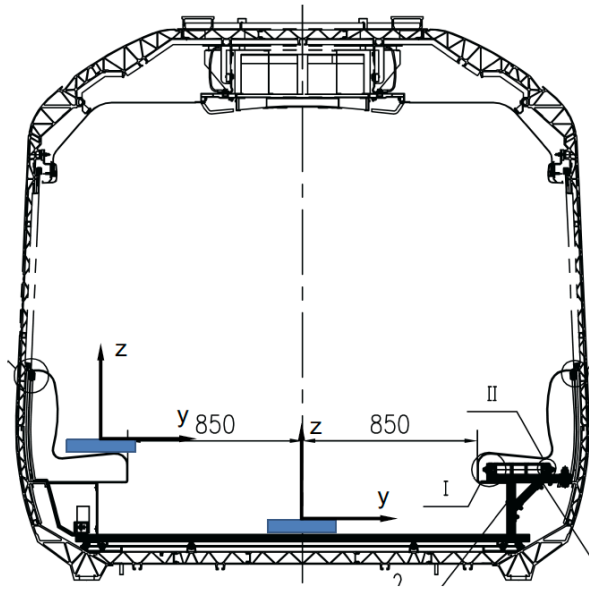
- 1.1 เพื่อวัดระดับการสั่นสะเทือนในขบวนรถไฟที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนตัวรถไฟขณะขบวนรถไฟเคลื่อนที่ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO 2631 ที่มีต่อผู้โดยสาร
- 1.2 เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพ (health) และความสบายในการใช้บริการ (comfort)

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

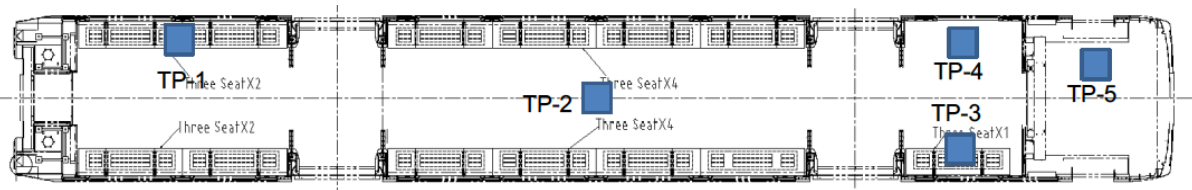
- 2.1 หัววัดแรงสั่นสะเทือนเซนเซอร์วัดความเร่ง 3 แกน (triaxial accelerometer)
- 2.2 ส่วนประมวลผลสัญญาณ (signal processor)
- 2.3 เครื่องสอบเทียบการสั่นสะเทือน (vibration calibrator)
- 2.4 เครื่องระบุตำแหน่ง (global positioning system)

3. การติดตั้ง

- 3.1 สถานที่ทดสอบเป็นพื้นที่ทางสายประธาน (main line) กลางแจ้งที่ใช้ในการเดินรถ
- 3.2 การตั้งค่าการทดสอบ
 - 3.2.1 เลือกพารามิเตอร์ขนาดอัตราเร่งทั้ง 3 แกน
 - 3.2.2 ความถี่ 0.5 Hz. ถึง 80 Hz.
- 3.3 การติดตั้งเซนเซอร์และสายสัญญาณต้องทำการยึดอยู่กับที่ จุดทดสอบ (test point – TP) ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2631-4 ดังรูปที่ ก.1 โดยให้พิจารณาดังนี้
 - 3.3.1 สำหรับการประเมินการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพ (health) ให้ติดตั้งบนที่นั่งของผู้โดยสาร
 - 3.3.2 สำหรับการประเมินการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อความสบายในการใช้บริการ (comfort) ให้ติดตั้งบนที่นั่งของผู้โดยสารและบนพื้นอื่น



(ก) ตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ภายในห้องโดยสารในแนวแกนทั้งสาม (vertical, lateral, longitudinal)



(ข) จุดทดสอบสำหรับติดตั้งเซนเซอร์จำแนกตามพื้นที่ใช้สอยภายในห้องโดยสารและห้องพนักงานขับ

รูปที่ ก.1 ตัวอย่างตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์และจุดทดสอบ (TP) ภายในขบวนรถไฟ

(ที่มา: ISO 2631-4)

4. ข้อกำหนดการทดสอบ

- 4.1 การทดสอบจะดำเนินการด้วยระบบขับเคลื่อนตัวรถไฟ 1 ขบวน การทดสอบจะดำเนินการในสถานะอยู่กับที่ตามที่กำหนดไว้ใน ISO 2631 โดยมีรายละเอียดดังนี้
 - 4.1.1 ระบบขับเคลื่อนตัวรถไฟจะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์และวัสดุภายในอย่างสมบูรณ์ หน้าต่างและประตูอยู่ในตำแหน่งที่ปิด
 - 4.1.2 กรณีรถขนส่งทางรางที่ใช้พลังงานขับเคลื่อนจากแบตเตอรี่ระดับพลังงานของแบตเตอรี่ไม่ต่ำกว่า 80% ของระดับสูงสุดโดยอุปกรณ์ของระบบถูกป้อนพลังงานจากชุดแบตเตอรี่ตลอดเวลา
 - 4.1.3 ระบบไฟฟ้าเสริมและอุปกรณ์บนรถไฟทั้งหมดจะต้องสามารถทำงานภายใต้สภาวะการทำงานปกติอย่างต่อเนื่อง

- 4.1.4 เส้นทางที่ทดสอบต้องมีการติดตั้งที่สมบูรณ์และสามารถทำความเร็วสูงสุดทุกเส้นทาง
- 4.1.5 การเดินรถจะมีการหยุดที่แต่ละสถานีและต่อเนื่องไปยังสถานีถัดไป
- 4.1.6 ขณะทำการทดสอบบนขบวนรถไฟจะมีเฉพาะเจ้าหน้าที่ทำการทดสอบเท่านั้นและจำกัดให้มีจำนวนน้อยที่สุด
- 4.1.7 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดทั้งหมดได้รับการสอบเทียบ
- 4.2 ข้อมูลต่อไปนี้จะถูกบันทึกขึ้นระหว่างการทดสอบ:
 - 4.2.1 ค่าเฉลี่ยกำลังสองอัตราเร่งแบบมีการถ่วงน้ำหนักความถี่ 3 แกน (rms frequency-weighted acceleration magnitude) ภายในขบวนรถไฟ
 - 4.2.2 สภาพแวดล้อม ประกอบด้วย สถานีที่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์
- 4.3 ชีตจำกัด
 - 4.3.1 ชีตจำกัดสำหรับการทดสอบให้ยึดตามที่ระบุในหัวข้อ 10.3
- 5. ขั้นตอนการทดสอบ
 - 5.1 ป้อนพลังงานอุปกรณ์บนขบวนรถไฟทั้งหมดและทำงานภายใต้สภาวะการทำงานปกติ เช่น ระบบทั้งหมดเปิดใช้งานอยู่ในสภาวะเสถียร ระบบไฟฟ้าส่องสว่างทั้งหมดทำงานปกติ
 - 5.2 ขับเคลื่อนขบวนรถไฟเป็นไปตามแผนการเดินรถ
 - 5.3 บันทึกอัตราเร่งทั้ง 3 แกนในหน่วย m/s^2 ทุกจุดทดสอบ
 - 5.4 ทำการทดสอบเส้นทางเดินรถปกติ
 - 5.5 ทำการทดสอบเส้นทางเดินรถปกติทิศทางเดินรถตรงข้าม
 - 5.6 ทำการทดสอบเส้นทางเดินรถคู่ขนาน
 - 5.7 การทดสอบเส้นทางเดินรถคู่ขนานทิศทางเดินรถตรงข้าม
 - 5.8 คำนวณอัตราเร่งของการสั่นสะเทือนแบบมีการถ่วงน้ำหนักจากค่าที่บันทึก
 - 5.9 ทำการทดสอบซ้ำเส้นทางละสามครั้ง
- 6. บันทึกผลการทดสอบ
 - 6.1 ตัวอย่างตารางแสดงการบันทึกผลการทดสอบทั้งหมดและข้อมูลการทดสอบที่เกี่ยวข้องในแต่ละกรณีทดสอบ โดยอาจปรับเปลี่ยนตามรูปแบบรายงานของหน่วยงานทดสอบ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบ

ขั้นตอน	*รายละเอียด	เป้าหมาย	**ผลการวัด	**ผลการคำนวณ	pass/fail
1	บันทึกรหัสของ ขบวนรถไฟ บันทึกข้อมูล สภาพแวดล้อม	เพื่อเป็นข้อมูล ประกอบการ ทดสอบ	Train ID: _____ Temp: ____ [°C] Humidity: ____ [%] Pressure: ____ [kPa]	-	-
2	ตรวจสอบการ ปิดระบบป้องกัน พลังงาน	ระบบ ขับเคลื่อนตัว รถไฟต้อง ปราศจากการ ป้องกันพลังงาน	☐ ยืนยัน	-	-
3	ปิดหน้าต่างและ ประตู	สอดคล้อง ขั้นตอนการ ทดสอบ	☐ ยืนยัน	-	-
4	วัดและคำนวณ อัตราเร่งของ การสั่นสะเทือน แบบมีการถ่วง น้ำหนัก	เพื่อเป็นข้อมูล ประกอบการ ทดสอบในแต่ละ จุดทดสอบ	-	-	-
4.1	ด้านสุขภาพ เส้นทาง เดินรถ ปกติ $k_x = 1.4$ $k_y = 1.4$ $k_z = 1$	$A(8) \leq 0.5$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$ $A(8) = a_v(T/8)^{0.5}$, T คือช่วงเวลาที่ ทดสอบ	☐ ผ่าน (Pass) ☐ ไม่ผ่าน (Fail) $A(8) = \dots\dots\dots m/s^2$
	ด้านความ สะดวกสบาย $k_x = 1$ $k_y = 1$ $k_z = 1$	$a_v \leq 0.315$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$	☐ ผ่าน (Pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A_v = \dots\dots\dots m/s^2$ ☐ ไม่สบายเล็กน้อย ☐ ค่อนข้างไม่สบาย

ขั้นตอน	*รายละเอียด	เป้าหมาย	**ผลการวัด	**ผลการคำนวณ	pass/fail
					☐ ไม่สบาย ☐ ไม่สบายมาก ☐ ไม่สบายมากที่สุด
4.2	ด้านสุขภาพ เส้นทาง $k_x = 1.4$ เติรรถ $k_y = 1.4$ ปกติ $k_z = 1$ ทิศทาง เติรรถ ตรงข้าม	$A(8) \leq 0.5$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$ $A(8) = a_v(T/8)^{0.5}$, T คือช่วงเวลา ทดสอบ	☐ ผ่าน (pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A(8) = \dots\dots\dots m/s^2$
	ด้านความ สะดวกสบาย $k_x = 1$ $k_y = 1$ $k_z = 1$	$a_v < 0.315$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$	☐ ผ่าน (pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A_v = \dots\dots\dots m/s^2$ ☐ ไม่สบายเล็กน้อย ☐ ค่อนข้างไม่สบาย ☐ ไม่สบาย ☐ ไม่สบายมาก ☐ ไม่สบายมากที่สุด
4.3	ด้านสุขภาพ เส้นทาง $k_x = 1.4$ เติรรถ $k_y = 1.4$ คู่ขนาน $k_z = 1$	$A(8) \leq 0.5$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$ $A(8) = a_v(T/8)^{0.5}$, T คือช่วงเวลา ทดสอบ	☐ ผ่าน (pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A(8) = \dots\dots\dots m/s^2$
	ด้านความ สะดวกสบาย $k_x = 1$ $k_y = 1$ $k_z = 1$	$a_v < 0.315$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$	☐ ผ่าน (pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A_v = \dots\dots\dots m/s^2$ ☐ ไม่สบายเล็กน้อย ☐ ค่อนข้างไม่สบาย

ขั้นตอน	*รายละเอียด	เป้าหมาย	**ผลการวัด	**ผลการคำนวณ	pass/fail
			$a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$		☐ ไม่สบาย ☐ ไม่สบายมาก ☐ ไม่สบายมากที่สุด
4.4	ด้านสุขภาพ เส้นทาง $k_x = 1.4$ เดินรถ $k_y = 1.4$ คู่ขนาน $k_z = 1$ ทิศทาง เดินรถ ตรงข้าม	$A(8) \leq 0.5$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$ $A(8) = a_v(T/8)^{0.5}$, T คือช่วงเวลา ทดสอบ	☐ ผ่าน (pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A(8) = \dots\dots\dots m/s^2$
	ด้านความ สะดวกสบาย $k_x = 1$ $k_y = 1$ $k_z = 1$	$a_v < 0.315$ m/s^2	$a_{wx} = [\sum(a_x W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wy} = [\sum(a_y W_d)^2]^{0.5}$ $a_{wz} = [\sum(a_z W_k)^2]^{0.5}$	$a_v = [k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2]^{0.5}$	☐ ผ่าน (pass) ☐ ไม่ผ่าน (fail) $A_v = \dots\dots\dots m/s^2$ ☐ ไม่สบายเล็กน้อย ☐ ค่อนข้างไม่สบาย ☐ ไม่สบาย ☐ ไม่สบายมาก ☐ ไม่สบายมากที่สุด

หมายเหตุ 1) กรณีที่ผลการวัด ไม่ผ่าน (fail) ให้ผู้ทดสอบระบุอัตราเร่งที่วัดได้ พร้อมระบุระดับของความ
สะดวกสบาย ดังเกณฑ์การยอมรับในตารางที่ 3

2) * การประเมินผลกระทบด้านสุขภาพให้ดูใน ภาคผนวก ค และการประเมินผลกระทบด้านความ
สบายให้ดูในภาคผนวก ง

3) ** การคำนวณการสั่นสะเทือนให้ดูใน ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

การคำนวณการสั่นสะเทือน

1. วิธีการประเมินแบบพื้นฐานโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted root-mean-square acceleration)

การประเมินการสั่นสะเทือน อ้างอิงจาก ISO 2631 จะมีการรวมการวัดโดยใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักเสมอ ตามรายละเอียดที่ระบุดังนี้

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักจะระบุไว้ในหน่วย m/s^2 สำหรับการสั่นสะเทือนเชิงเส้น (translational vibration) และในหน่วยเรเดียนต่อวินาทีกำลังสอง (rad/s^2) สำหรับการสั่นสะเทือนเชิงหมุน (rotational vibration) ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักจะต้องมีการคำนวณดังสูตรด้านล่าง หรือสมการที่ค่าเทียบเท่ากันใน frequency domain

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

โดยที่

$a_w(t)$ คือ อัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักในรูปแบบของฟังก์ชันเวลา ในหน่วย m/s^2 หรือในหน่วยเรเดียนต่อวินาทีกำลังสอง (rad/s^2)

T คือ ระยะเวลาในการวัดค่า มีหน่วยเป็น s

การถ่วงน้ำหนักแนะนำให้ใช้ค่าจากกราฟตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 2 และ 3 สำหรับค่าเชิงตัวเลขของการถ่วงน้ำหนักที่สัมพันธ์กันถูกระบุไว้ในตารางที่ ข.1 และ ข.2

2. การใช้การประเมินแบบพื้นฐาน

2.1 คำจำกัดความของตัวประกอบค่ายอด (crest factor)

คำจำกัดความของตัวประกอบค่ายอดได้นิยามไว้ว่าเป็นค่า modulus ของอัตราส่วนระหว่างค่ายอดสูงสุดทันทีทันใด (maximum instantaneous peak value) ของสัญญาณอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนัก ความถี่ (frequency-weighted acceleration signal) กับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย โดยที่ค่ายอดจะต้องเป็นค่ายอดที่สูงที่สุดจากตลอดระยะเวลาในการวัดค่าในแต่ละรอบ เช่น ในคาบเวลา T ที่ใช้สำหรับการหาปริพันธ์สำหรับค่ารากกำลังสองเฉลี่ย

หมายเหตุ ตัวประกอบค่ายอดไม่จำเป็นที่จะใช้ระบุความรุนแรงในการสั่นสะเทือน และอาจมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการวัด

2.2 การประเมินแบบพื้นฐานสำหรับการสั่นสะเทือนที่มีตัวประกอบค่ายอดที่มีค่าสูง

ตัวประกอบค่ายอดอาจจะนำมาใช้ในการตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีการประเมินแบบพื้นฐานสำหรับการระบุถึงความรุนแรงในการสั่นสะเทือนที่มีเกี่ยวข้องกันกับผลกระทบต่อมนุษย์ สำหรับการสั่นสะเทือนที่มีตัวประกอบค่ายอดต่ำกว่าหรือเท่ากับ 9 วิธีการประเมินแบบพื้นฐานจะถือว่าเพียงพอ

หมายเหตุ สำหรับการสั่นสะเทือนบางประเภทโดยเฉพาะพวกที่มีการกระแทกชั่วครั้งชั่วคราว วิธีการประเมินแบบพื้นฐานอาจประมาณการณความรุนแรงได้น้อยเกินกว่าที่ควร ทำให้เกิดการไม่สบายตัว ถึงแม้ว่าตัวประกอบค่ายอดไม่ได้มีค่ามากกว่า 9 ในกรณีที่มีความไม่มั่นใจในผลลัพธ์ แนะนำให้มีการใช้การประเมินแบบเพิ่มเติมและต้องรายงานถึงการประเมินแบบเพิ่มเติม

2.3 วิธีการประเมินเพิ่มเติมกรณีวิธีการประเมินแบบพื้นฐานไม่เพียงพอ

สำหรับกรณีที่วิธีการประเมินแบบพื้นฐานนั้นอาจจะประมาณการณผลกระทบจากการสั่นสะเทือนได้น้อยเกินกว่าที่ควรจะเป็น เช่น ในกรณีตัวประกอบค่ายอดที่มีค่าสูง การกระแทกชั่วครั้งชั่วคราว การสั่นสะเทือนแบบชั่วครู่ วิธีการประเมินเพิ่มเติมได้แก่ การใช้ค่า running r.m.s. หรือค่า fourth power vibration dose

ตารางที่ ข.1 – การถ่วงน้ำหนักความถี่แบบหลัก สำหรับ 1 ใน 3 ของ octave

(ที่มา: ISO 2631-1)

Frequency band number ¹⁾ x	Frequency f Hz	W_k		W_d		W_f	
		factor		factor		factor	
		X 1 000	dB	x 1 000	dB	x 1 000	dB
- 17	0.02					24.2	- 32.33
- 16	0.025					37.7	- 28.48
- 15	0.0315					59.7	- 24.47
- 14	0.04					97.1	- 20.25
- 13	0.05					157	- 16.10
- 12	0.063					267	- 11.49
- 11	0.08					461	- 6.73
- 10	0.1	31.2	- 30.11	62.4	- 24.09	695	- 3.16
- 9	0.125	48.6	- 26.26	97.3	- 20.24	895	- 0.96
- 8	0.16	79.0	- 22.05	158	- 16.01	1 006	0.05
- 7	0.2	121	- 18.33	243	- 12.28	992	- 0.07
- 6	0.25	182	- 14.81	365	- 8.75	854	- 1.37
- 5	0.315	263	- 11.60	530	- 5.52	619	- 4.17
- 4	0.4	352	- 9.07	713	- 2.94	384	- 8.31
- 3	0.5	418	- 7.57	853	- 1.38	224	- 13.00
- 2	0.63	459	- 6.77	944	- 0.50	116	- 18.69
- 1	0.8	477	- 6.43	992	- 0.07	53.0	- 25.51
0	1	482	- 6.33	1 011	0.10	23.5	- 32.57
1	1.25	484	- 6.29	1 008	0.07	9.98	- 40.02
2	1.6	494	- 6.12	968	- 0.28	3.77	- 48.47
3	2	531	- 5.49	890	- 1.01	1.55	- 56.19
4	2.5	631	- 4.01	776	- 2.20	0.64	- 63.93
5	3.15	804	- 1.90	642	- 3.85	0.25	- 71.96
6	4	967	- 0.29	512	- 5.82	0.097	- 80.26
7	5	1 039	0.33	409	- 7.76		
8	6.3	1 054	0.46	323	- 9.81		
9	8	1 036	0.31	253	- 11.93		
10	10	988	- 0.10	202	- 13.91		
11	12.5	902	- 0.89	161	- 15.87		
12	16	768	- 2.28	125	- 18.03		
13	20	636	- 3.93	100	- 19.99		
14	25	513	- 5.80	80.0	- 21.94		
15	31.5	405	- 7.86	63.2	- 23.98		
16	40	314	- 10.05	49.4	- 26.13		
17	50	246	- 12.19	38.8	- 28.22		
18	63	186	- 14.61	29.5	- 30.60		
19	80	132	- 17.56	21.1	- 33.53		

Frequency band number ¹⁾ x	Frequency f Hz	W_k		W_d		W_f	
		factor		factor		factor	
		X 1 000	dB	x 1 000	dB	x 1 000	dB
20	100	88.7	- 21.04	14.1	- 36.99		
21	125	54.0	- 25.35	8.63	- 41.28		
22	160	28.5	- 30.91	4.55	- 46.84		
23	200	15.2	- 36.38	2.43	- 52.30		
24	250	7.90	- 42.04	1.26	- 57.97		
25	315	3.98	- 48.00	0.64	- 63.92		
26	400	1.95	- 54.20	0.31	- 70.12		

ตารางที่ ข.2 – การถ่วงน้ำหนักความถี่แบบเพิ่มเติม สำหรับ 1 ใน 3 ของ octave

(ที่มา: ISO 2631-1)

Frequency band number ¹⁾ x	Frequency f Hz	W_c		W_e		W_j	
		factor		factor		factor	
		X 1 000	dB	x 1 000	dB	x 1 000	dB
- 10	0.1	62.4	- 24.11	62.5	- 24.08	31.0	- 30.18
- 9	0.125	97.2	- 20.25	97.5	- 20.22	48.3	- 26.32
- 8	0.16	158	- 16.03	159	- 15.98	78.5	- 22.11
- 7	0.2	243	- 12.30	245	- 12.23	120	- 18.38
- 6	0.25	364	- 8.78	368	- 8.67	181	- 14.86
- 5	0.315	527	- 5.56	536	- 5.41	262	- 11.65
- 4	0.4	708	- 3.01	723	- 2.81	351	- 9.10
- 3	0.5	843	- 1.48	862	- 1.29	417	- 7.60
- 2	0.63	929	- 0.64	939	- 0.55	458	- 6.78
- 1	0.8	972	- 0.24	941	- 0.53	478	- 6.42
0	1	991	- 0.08	880	- 1.11	484	- 6.30
1	1.25	1 000	0.00	772	- 2.25	485	- 6.28
2	1.6	1 007	0.06	632	- 3.99	483	- 6.32
3	2	1 012	0.10	512	- 5.82	482	- 6.34
4	2.5	1 017	0.15	409	- 7.77	489	- 6.22
5	3.15	1 022	0.19	323	- 9.81	524	- 5.62
6	4	1 024	0.20	253	- 11.93	628	- 4.04
7	5	1 013	0.11	202	- 13.91	793	- 2.01
8	6.3	974	- 0.23	160	- 15.94	946	- 0.48
9	8	891	- 1.00	125	- 18.03	1 017	0.15
10	10	776	- 2.20	100	- 19.98	1 030	0.26
11	12.5	647	- 3.79	80.1	- 21.93	1 026	0.22
12	16	512	- 5.82	62.5	- 24.08	1 018	0.16

Frequency band number ¹⁾ x	Frequency f Hz	W_c		W_e		W_j	
		factor X 1 000	dB	factor x 1 000	dB	factor x 1 000	dB
13	20	409	- 7.77	50.0	- 26.02	1 012	0.10
14	25	325	- 9.76	39.9	- 27.97	1 007	0.06
15	31.5	256	- 11.84	31.6	- 30.01	1 001	0.00
16	40	199	- 14.02	24.7	- 32.15	991	- 0.08
17	50	156	- 16.13	19.4	- 34.24	972	- 0.24
18	63	118	- 18.53	14.8	- 36.62	931	- 0.62
19	80	84.4	- 21.47	10.5	- 39.55	843	- 1.48
20	100	56.7	- 24.94	7.07	- 43.01	708	- 3.01
21	125	34.5	- 29.24	4.31	- 47.31	539	- 5.36
22	160	18.2	- 34.80	2.27	- 52.86	364	- 8.78
23	200	9.71	- 40.26	1.21	- 58.33	243	- 12.30
24	250	5.06	- 45.92	0.63	- 63.99	158	- 16.03
25	315	2.55	- 51.88	0.32	- 69.94	100	- 19.98
26	400	1.25	- 58.08	0.16	- 76.14	62.4	- 24.10

2.3.1 วิธีการ running r.m.s.

วิธีการประเมินแบบ running r.m.s. จะนำการกระแทกที่เกิดขึ้นชั่วครั้งชั่วคราวและการสั่นสะเทือนแบบชั่วคราวมาใช้ในการหาปริพันธ์เวลาช่วงสั้น ขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกกำหนดให้เป็นค่าสูงสุดของการสั่นสะเทือนแบบชั่วคราว (maximum transient vibration value: MTWV) โดยกำหนดให้เป็นค่าสูงสุดของ $a_w(t_0)$ ดังนี้

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

โดยที่

$a_w(t)$ คือ อัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักความถี่ทันทีทันใด (instantaneous frequency-weighted acceleration)

τ คือ ปริพันธ์เวลาสำหรับการหาค่าเฉลี่ย

t คือ เวลา (ตัวแปรสำหรับปริพันธ์)

t_0 คือ เวลาที่ใช้สำหรับการสังเกต ณ จุดใดจุดหนึ่งของเวลา (instantaneous time)

โดยสูตรปริพันธ์เชิงเส้นนี้สามารถถูกประมาณการโดยการหาปริพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 8041 ดังนี้

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} [a_w(t)]^2 \cdot \exp \left[\frac{t-t_0}{\tau} \right] dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ความแตกต่างในผลลัพธ์ถือว่าน้อยมากสำหรับการนำไปใช้กับกรณีที่มีการกระแทกเป็นระยะเวลาสั้น ๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ τ และยังให้ค่าที่สูงกว่า (ไม่เกิน 30%) เมื่อนำไปใช้กับกรณีที่มีการกระแทกและการสั่นสะเทือนแบบชั่วคราวเป็นระยะเวลานานกว่า

ค่าสูงสุดของค่าการสั่นสะเทือนแบบชั่วคราว กำหนดให้เป็นดังนี้

$$MTWV = \max[a_w(t_0)] \quad (4)$$

เช่น ขนาดสูงสุดที่อ่านได้ของ $a_w(t_0)$ ขณะที่ยังอยู่คาบเวลาในการวัด

โดยแนะนำให้เลือกใช้ $\tau = 1$ ในการวัดค่า MTWV

2.3.2 วิธีการ fourth power vibration dose

วิธีการ fourth power vibration dose นั้นจะอ่อนไหวต่อค่ายอดมากกว่าวิธีการประเมินแบบพื้นฐานโดยการใช้เลขชี้กำลังให้มีค่าเป็น 1/4 แทนที่จะเป็น 1/2 ของอัตราเร่งเมื่อใช้เวลาสำหรับการเฉลี่ยโดยทั่วไป ค่า fourth power vibration dose value (VDV) จะอยู่ในหน่วย $m/s^{1.75}$ หรือในหน่วยเรเดียนต่อวินาทียกกำลัง 1.75 ($rad/s^{1.75}$) ดังนี้

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

โดยที่

$a_w(t)$ คือ อัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักความถี่ทันทีทันใด (instantaneous frequency-weighted acceleration)

T คือ ระยะเวลาในการวัด

หมายเหตุ เมื่อการสัมผัสถึงการสั่นสะเทือนประกอบไปด้วยคาบเวลาที่มากกว่า 2 คาบ (จำนวนคาบเวลา = i) หรือที่ขนาดการสั่นแตกต่างกัน ค่า VDV สำหรับการสัมผัสทั้งหมดจะต้องคำนวณมาจากกราฟที่ 4 ของผลรวมของค่า VDV ดังนี้

$$VDV_{total} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

2.3.3 อัตราส่วนสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างการประเมินแบบพื้นฐานและแบบเพิ่มเติม

การใช้วิธีการประเมินเพิ่มเติมถือว่ามีความสำคัญในการตัดสินผลกระทบที่เกิดจากการสั่นสะเทือนกับมนุษย์เมื่อค่าอัตราส่วนมีค่าสูงเกิน (ขึ้นอยู่กับวิธีการประเมินเพิ่มเติมที่เลือกใช้) กว่าค่าที่ใช้ในการประเมินทางด้านสุขภาพและความสบาย

$$\frac{MTVV}{a_w} = 1.5 \quad (7)$$

$$\frac{VDV}{a_w T^{1/4}} = 1.75 \quad (8)$$

วิธีการประเมินพื้นฐานควรจะใช้สำหรับการประเมินการสั่นสะเทือน ในกรณีที่มีการใช้วิธีการประเมินเพิ่มเติมร่วมด้วย ผลการประเมินทั้งการประเมินแบบพื้นฐานและเพิ่มเติมจะต้องมีการบันทึกในรายงาน

2.4 การถ่วงน้ำหนักความถี่ (frequency weighting)

2.4.1 การถ่วงน้ำหนักความถี่ของอัตราเร่งสำหรับประวัติเวลา (frequency weighting of acceleration time history)

สำหรับปริพันธ์ของการถ่วงน้ำหนักความถี่ของอัตราเร่งสำหรับประวัติเวลา การถ่วงน้ำหนักความถี่จะต้องนำมาจากภาคผนวก ค ง และ จ ตามแต่ความเหมาะสม

ลักษณะที่การสั่นสะเทือนส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ความสบาย ความสามารถในการรับรู้ และความวิงเวียนนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของการสั่นสะเทือนนั้น ๆ การถ่วงน้ำหนักความถี่จะต้องมีความแตกต่างกันในแต่ละแกนของการสั่นสะเทือน จะต้องมีการถ่วงน้ำหนักความถี่แบบพิเศษสำหรับการประเมินการสั่นสะเทือนด้วยความถี่ต่ำที่มีผลกระทบต่อความวิงเวียน

หลักการของการถ่วงน้ำหนักความถี่มีอยู่ 2 ประเภท ที่เกี่ยวเนื่องกับด้านสุขภาพ ความสบาย และความสามารถในการรับรู้ ดังตารางที่ 3

W_k สำหรับทิศทางแกน z และสำหรับการนอนราบในแนวตั้ง (ยกเว้นบริเวณศีรษะ)

W_d สำหรับทิศทางแกน x และ y และสำหรับการนอนราบในแนวนอน

หลักการของการถ่วงน้ำหนักความถี่ที่เกี่ยวเนื่องกับความวิงเวียนระบุในตารางที่ 3 ด้วย W_f สำหรับการถ่วงน้ำหนักความถี่แบบเพิ่มเติมจะมีการระบุเอาไว้ในตารางที่ 4 สำหรับกรณีพิเศษดังนี้

- การวัดบริเวณพนักพิง (W_c)
- การวัดการสั่นสะเทือนแบบหมุน (W_e)
- การวัดการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งใต้บริเวณศีรษะของมนุษย์ที่นอนราบ (W_j)

ตารางที่ ข.1 และ ข.2 ได้มีการให้ข้อมูลเกี่ยวกับการถ่วงน้ำหนักความถี่แบบหลักและเพิ่มเติม กราฟการถ่วงน้ำหนักความถี่ที่เกี่ยวข้องจะแสดงอยู่ที่รูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งมีการจำกัดแถบความถี่

2.4.1.1 การจำกัดแถบความถี่

การจำกัดแถบความถี่สำหรับความถี่ต่ำและสูงจะต้องใช้ตัวกรองความถี่ต่ำและสูงแบบ two-pole ด้วย Butterworth characteristics ทำให้ได้ความชันเชิงเส้นกำกับ (asymptotic slope) ที่ -12 dB/octave ความถี่มุม (corner frequency) สำหรับตัวกรองจำกัดแถบความถี่ คือ $1/3$ octave

การถ่วงน้ำหนักความถี่รวมถึงตัวกรองจำกัดแถบ โดยมี high pass ที่ 0.4 Hz. และ low pass ที่ 100 Hz. โดยจะใช้กับการถ่วงน้ำหนักแบบ W_c , W_d , W_e , W_j และ W_k ในขณะที่การถ่วงน้ำหนักความถี่แบบ W_f มีการกรองจำกัดแถบผ่านต่ำและผ่านสูงที่ 0.08 Hz. และ 0.63 Hz. ตามลำดับ

2.4.1.2 พิกัดการเผื่อ (tolerances)

ภายในขอบเขตของช่วงความถี่ที่กำหนด และ $1/3$ ของ octave จากความถี่จำกัด พิกัดการเผื่อของการถ่วงน้ำหนักความถี่ที่นำมารวมกัน และแถบจำกัดความถี่จะต้องไม่เกินกว่า ± 1 dB สำหรับพิกัดการเผื่อแบบอื่นนอกเหนือไปจากนี้ จะต้องไม่เกินกว่า ± 2 dB ค่าการลดทอน (attenuation) สำหรับ 1 octave ของบริเวณรอบข้างของช่วงความถี่ที่กำหนด สามารถสูงจนเป็นอนันต์ได้ (กรุณาดูเพิ่มเติมที่ ISO 8041 ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับพิกัดการเผื่อ)

2.4.2 การถ่วงน้ำหนักความถี่ของอัตราเร่งสำหรับสเปกตรัม

การวิเคราะห์สัญญาณอัตราเร่งสามารถทำเป็นสเปกตรัมด้วยความกว้างแถบคงที่ (constant bandwidth spectra) หรือความกว้างแถบแบบเป็นสัดส่วนเป็นส่วน (proportional bandwidth spectra) (เช่น $1/3$ octave) ของอัตราเร่งก่อนถ่วงน้ำหนักได้ ในกรณี $1/3$ octave ค่าความถี่กลาง (centre frequencies) จะต้องเป็นไปตามที่ได้มีการระบุเอาไว้ในตารางที่ ข.1 และ ข.2 วิธีในการวิเคราะห์ข้อมูลจะต้องสอดคล้องตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ใน IEC 61260

อัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักความถี่รากกำลังสองเฉลี่ยจะถูกวัดโดยการถ่วงน้ำหนักและข้อมูล narrow band หรือ $1/3$ octave ที่เหมาะสมเพิ่มเติมด้วย

ในส่วนของการแปลงผันของข้อมูลของ $1/3$ octave จะต้องมีการใช้ตัวแปรการถ่วงน้ำหนักที่ได้ระบุในตารางที่ ข.1 และ ข.2 โดยอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักโดยรวมจะต้องถูกคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

โดยที่

a_w คือ อัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักความถี่

w_i คือ ตัวแปรการถ่วงน้ำหนัก สำหรับลำดับที่ i ของ $1/3$ ของแถบ octave ที่ได้ระบุเอาไว้ในตารางที่ ข.1 และ ข.2

a_i คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่ง สำหรับลำดับที่ i ของ 1/3 ของแถบ octave.

2.5 การรวมการสั่นสะเทือนที่มากกว่า 1 ทิศทางเข้าด้วยกัน

ค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนัก คำนวณจากการสั่นสะเทือนในระบบพิกัดฉากดังนี้

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

โดยที่

a_{wx} , a_{wy} , a_{wz} คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนัก ในแกน x , y , z ตามลำดับ

k_x , k_y , k_z คือ ค่าตัวประกอบพหุคูณ

แนะนำให้ใช้งานค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ a_v สำหรับประเมินด้านความสบาย

หมายเหตุ

(1) ค่าที่ถูกต้องของตัวประกอบพหุคูณ (multiplying factor) ขึ้นอยู่กับประเภทของการถ่วงน้ำหนักความถี่ที่นำมาเลือกคำนวณ โดยจะถูกระบุอยู่ในภาคผนวก ค

(2) ถ้าไม่มีแกนหลักที่เกิดการสั่นสะเทือน จะต้องมีการระบุถึงค่าสำหรับการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์สำหรับการประเมินด้านสุขภาพ

2.6 ข้อเสนอแนะการใช้วิธีการในการประเมินการสั่นสะเทือน

ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้วิธีการในการประเมินและการถ่วงน้ำหนักความถี่แบบต่าง ๆ ได้ถูกระบุเอาไว้ในภาคผนวก ค ด้านสุขภาพ และภาคผนวก ง ด้านความสบายและความสามารถในการรับรู้

ภาคผนวก ค

การประเมินผลกระทบด้านสุขภาพ

1. การนำไปใช้

หัวข้อนี้พูดถึงถึงผลกระทบของการสั่นสะเทือนแบบคาบเวลา แบบสุ่ม และแบบชั่วคราว ต่อสุขภาพของมนุษย์ในการสัมผัสการสั่นสะเทือนแบบทั่วทั้งร่างกายในขณะเดินทาง ที่ทำงาน หรือระหว่างทำกิจกรรม โดยมุ่งเน้นไปที่มนุษย์ในท่านั่ง เนื่องจากผลกระทบของการสั่นสะเทือนทางด้านสุขภาพของมนุษย์ในท่าทางการยืน การเอนกาย หรือการนอนราบนั้นยังไม่ปรากฏ

ข้อเสนอแนะนี้สามารถใช้กับการสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 0.5 Hz. ถึง 80 Hz. ซึ่งส่งผ่านมาถึงร่างกายผ่านทางเบาะนั่ง

2. การประเมินการสั่นสะเทือน

2.1 ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนัก (สมการที่ 1) ต้องคำนวณแต่ละแกน (แกน x, y และ z) สำหรับการสั่นสะเทือนเชิงเส้นบนพื้นผิวที่รองรับมนุษย์

2.2 การถ่วงน้ำหนักความถี่จะต้องมีการนำตัวประกอบพหุคูณ k มาใช้กับมนุษย์ในท่านั่ง ดังนี้

แกน x: $W_d, k = 1.4$

แกน y: $W_d, k = 1.4$

แกน z: $W_k, k = 1$

หมายเหตุ การวัดในแกน x ที่บริเวณพนักพิง แนะนำให้ใช้การถ่วงน้ำหนักความถี่แบบ W_c โดยมี $k = 0.8$

2.3 การประเมินการสัมผัสต่อการสั่นสะเทือนสามารถทำได้โดยการคำนวณการสัมผัสการสั่นสะเทือนรายวัน $A(8)$ ซึ่งแสดงเป็นอัตราเร่งที่ต่อเนื่องเทียบเท่าในช่วงเวลา 8 ชั่วโมง การสัมผัสการสั่นสะเทือนรายวัน $A(8)$ ในหน่วย m/s^2 สำหรับแต่ละทิศทาง l เป็นดังนี้

$$A_l(8) = k_l \left[\frac{1}{T_0} \sum_i a_{wli}^2 T_i \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

โดยที่

a_{wli} คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนักคำนวณในช่วงเวลา T_i

$$k_x = k_y = 1.4 \text{ และ } k_z = 1$$

T_0 คือ ระยะเวลาอ้างอิงที่ 8 ชั่วโมง

2.4 การประเมินผลกระทบของการสั่นสะเทือนทางด้านสุขภาพจะต้องทำโดยเป็นอิสระต่อกันในแต่ละแกน การประเมินการสั่นสะเทือนจะต้องจัดทำโดยอิงจากอัตราเร่งการถ่วงน้ำหนักความถี่ที่มีค่าสูงสุดของแต่ละแกนของเบาะรองนั่ง

3. ค่าแนะนำสำหรับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนทางด้านสุขภาพ

การสัมผัสการสั่นสะเทือนรายวัน $A(8)$ มีค่าไม่เกิน 0.5 m/s^2

ภาคผนวก ง

การประเมินผลกระทบด้านความสบายและความสามารถในการรับรู้

1. การนำไปใช้

หัวข้อนี้เกี่ยวกับการประมาณการผลกระทบจากการสั่นสะเทือนในด้านความสบายและความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์ที่มีสุขภาพเป็นปกติ ผู้ซึ่งได้สัมผัสถึงการสั่นสะเทือนทั้งร่างกายแบบคาบเวลา แบบสุ่ม และแบบชั่วคราว ทั้งจากการเดินทาง ที่ทำงาน หรือขณะทำกิจกรรม

ในด้านความสบายของมนุษย์ในท่าหนึ่ง สามารถใช้ได้กับการสั่นสะเทือนแบบคาบเวลา แบบสุ่ม และแบบชั่วคราว ในช่วงความถี่ 0.5 Hz. ถึง 80 Hz. ซึ่งเกิดขึ้นได้ในแกนทั้ง 6 ของเบาะนั่ง (ทิศทางเชิงเส้น: แกน x แกน y และแกน z และทิศทางการหมุน: แกน r_x แกน r_y และแกน r_z) และสามารถใช้อกับแกนเชิงเส้นที่บริเวณพนักพิงและพื้นเท้า (รูปที่ 1)

ในด้านความสบายของมนุษย์ในท่ายืนและนอนราบ สามารถใช้ได้กับการสั่นสะเทือนแบบคาบเวลา แบบสุ่ม และแบบชั่วคราว ที่เกิดขึ้นที่แกนเชิงเส้นบริเวณพื้นผิวที่รับน้ำหนักของร่างกาย

กระบวนการในการประเมินทำให้สามารถคาดคะเน (จากขนาด ความถี่ และทิศทางของการสั่นสะเทือน) ผลกระทบด้านความสบายจากการสั่นสะเทือนในแบบต่าง ๆ

2. ความสบาย

2.1 ไม่มีข้อบ่งชี้เด่นชัดสำหรับการสั่นสะเทือนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาส่งผลกับความสบาย ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งแบบถ่วงน้ำหนักจะถูกคำนวณแต่ละแกนของการสั่นสะเทือน (แกน x, y และ z) บนพื้นผิวที่รองรับน้ำหนักของร่างกาย

หมายเหตุ เมื่อเงื่อนไขในการสั่นสะเทือนมีการผันผวน (ยกตัวอย่างเช่นบนขบวนรถไฟ) ความสบายอาจจะได้รับการประเมินจากค่าทางสถิติของค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณถ่วงน้ำหนักความถี่ต่าง ๆ อย่างเหมาะสม

2.2 การถ่วงน้ำหนักความถี่ที่ใช้สำหรับการคาดการณ์ผลกระทบของการสั่นสะเทือนด้านความสบาย W_c , W_d , W_e , W_j และ W_k ต้องมีตัวประกอบพหุคูณดังต่อไปนี้

สำหรับท่าทางการนั่งของมนุษย์

- แกน x (การสั่นสะเทือนบริเวณพื้นผิวที่นั่ง): W_d , $k = 1$
- แกน y (การสั่นสะเทือนบริเวณพื้นผิวที่นั่ง): W_d , $k = 1$

- แกน z (การสั่นสะเทือนบริเวณพื้นผิวที่นั่ง): $W_k, k = 1$

หมายเหตุ

(1) สำหรับวัตถุประสงค์การออกแบบเฉพาะความสบาย อาจใช้กราฟที่จะมีการถ่วงน้ำหนักแบบพิเศษที่เหมาะสม

(2) สำหรับสภาพแวดล้อมบางอย่าง ความสบายของท่านั่งอาจจะได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนเชิงหมุนของที่นั่ง จากการสั่นสะเทือนของบริเวณพนักพิง หรือจากการสั่นสะเทือนจากบริเวณพื้นเท้า การสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเหล่านี้อาจจะถูกประเมินโดยใช้การถ่วงน้ำหนักความถี่ดังต่อไปนี้

แกน r_x ของพื้นผิวที่นั่ง: $W_e, k = 0.63 \text{ m/rad}$

แกน r_y ของพื้นผิวที่นั่ง: $W_e, k = 0.4 \text{ m/rad}$

แกน r_z ของพื้นผิวที่นั่ง: $W_e, k = 0.2 \text{ m/rad}$

แกน x บริเวณพนักพิง: $W_c, k = 0.8$

แกน y บริเวณพนักพิง: $W_d, k = 0.5$

แกน z บริเวณพนักพิง: $W_d, k = 0.4$

แกน x บริเวณพื้นเท้า: $W_k, k = 0.25$

แกน y บริเวณพื้นเท้า: $W_k, k = 0.25$

แกน z บริเวณพื้นเท้า: $W_k, k = 0.4$

โดยที่ k คือ ตัวประกอบพหุคูณ

สำหรับท่าทางการยืนของมนุษย์

- แกน x (การสั่นสะเทือนบริเวณพื้น): $W_d, k = 1$

- แกน y (การสั่นสะเทือนบริเวณพื้น): $W_d, k = 1$

- แกน z (การสั่นสะเทือนบริเวณพื้น): $W_k, k = 1$

สำหรับท่าทางการนอนราบของมนุษย์ โดยวัดจากบริเวณด้านล่างของกระดูกเชิงกราน

- แกนแนวนอน: $W_d, k = 1$

- แกนแนวตั้ง: $W_k, k = 1$

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่มีหมอนนุ่ม แนะนำให้วัดบริเวณใต้ศีรษะด้วย และใช้การถ่วงน้ำหนักความถี่ $W_j = 1$ แม้ว่าจะไม่มีการแนะนำอย่างชัดเจน

2.3 การสั่นสะเทือนที่มากกว่า 1 ทิศทาง และมากกว่า 1 จุด

การวัดโดยทั่วไปจะรวมทิศทางเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องทั้งหมด และอาจจะมีการรวมจุดอื่นที่ส่งผลกระทบต่อความสบาย ค่าที่มีการถ่วงน้ำหนักจากการวัดในทุกแกนในแต่ละตำแหน่งจะต้องมีการรายงานแยก

ทุกจุดที่มีการวัดนั้น ค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ที่จุดจะต้องถูกคำนวณด้วยการบวกแบบผลรวมรากกำลังสอง (root-sum-of-squares summation) ค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ที่จุดสามารถทำการเปรียบเทียบแยกกันด้วยตัวแปรที่ใกล้เคียงกันในสภาพแวดล้อมอื่น ๆ และข้อกำหนดแบบอื่นๆของระบบก็ได้เช่นกัน

บริเวณที่ความสบายได้รับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนมากกว่า 1 จุด ค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ทั้งหมดสามารถหาได้จากการนำค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ที่จุดมาทำการบวกด้วยวิธีการผลรวมรากกำลังสอง (เช่น การสั่นสะเทือนเชิงเส้นบริเวณบนที่นั่ง ที่พนักพิง และบริเวณพื้นเท้า)

หมายเหตุ

(1) ในบางสภาพแวดล้อมอาจจะมีการนั่ง ยืน และนอนราบของมนุษย์ที่ผสมผสานกันหลากหลายรูปแบบ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการคำนึงถึงผลกระทบสำหรับทุกตำแหน่งและท่าทางต่าง ๆ ของร่างกาย

(2) ในการสั่นสะเทือนเชิงหมุนบางกรณี อาจจะต้องให้ความสำคัญกับการประเมินในด้านความสบาย ในกรณีที่มีค่าการสั่นสะเทือนเชิงหมุนสัมบูรณ์ที่จุดอาจถูกรวมในการบวกแบบผลรวมรากกำลังสองสำหรับการคำนวณค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ทั้งหมด (ค่าการสั่นสะเทือนเชิงหมุนสัมบูรณ์ที่จุดสามารถคำนวณได้จากสมการที่คล้ายคลึงกับสมการที่ 10)

(3) ถ้ามีการระบุค่าถ่วงน้ำหนักในแกนใดแกนหนึ่ง (หรือในทิศทางการหมุน) โดยที่มีค่าน้อยกว่า 25% ของค่าสูงสุดที่หามาได้ ณ ตำแหน่งเดียวกันแต่อยู่ในแกนอื่น (หรือในทิศทางการหมุน) สามารถตัดออกได้ในทำนองเดียวกัน ถ้าค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ที่จุดที่ตำแหน่งหนึ่งมีค่าน้อยกว่า 25% ของค่าสูงสุดของค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ที่จุด ก็สามารถยกเว้นได้เช่นกัน

(4) การสั่นสะเทือนในแนวนอนที่บริเวณพนักพิง สามารถส่งผลกับด้านความสบายอย่างมาก หากไม่สามารถวัดการสั่นสะเทือนที่บริเวณพนักพิง ตัวประกอบพหุคูณที่มีค่า 1.4 สามารถใช้แทนค่าที่เป็น 1 สำหรับแกน x และแกน y ของพื้นผิวรับแรงของที่นั่งในการประมาณการความสบาย

3. ความสามารถในการรับรู้

3.1 การนำไปใช้

สำหรับความสามารถในการรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนจากท่าทางการยืน นั่ง และนอนราบ คำแนะนำสำหรับการสั่นสะเทือนแบบคาบเวลา และแบบสุ่มที่เกิดขึ้นในแกนเชิงเส้นทั้งสาม (แกน x, y และ z) บนบริเวณพื้นผิวที่รองรับน้ำหนักของร่างกาย

3.2 การประเมินการสั่นสะเทือน

ค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนัก (สมการที่ 1) ต้องหาในแต่ละแกน (x, y และ z) บริเวณพื้นผิวที่รองรับน้ำหนักของร่างกาย

การประเมินสำหรับความสามารถในการรับรู้การสั่นสะเทือนจะต้องทำโดยอ้างอิงกับค่าสูงสุดของค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนัก ที่ได้ในแกน ที่จุด และในเวลาใด ๆ

3.3 การถ่วงน้ำหนักความถี่

การถ่วงน้ำหนักความถี่ทั้งสองแบบ ได้แก่ W_k สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง และ W_d สำหรับการสั่นสะเทือนในแนวนอน ใช้ในการประเมินความสามารถในการรับรู้การสั่นสะเทือน โดยที่การถ่วงน้ำหนักใช้กับท่าทางและแกนการสั่นสะเทือน ดังนี้

แกน x, y, z บริเวณพื้นผิวที่รับน้ำหนักของที่นั่ง สำหรับท่านั่ง, $k = 1$

แกน x, y, z บริเวณพื้นด้านล่างของร่างกายในท่านอน, $k = 1$

แกน x, y, z บริเวณพื้นผิวรองรับน้ำหนักของร่างกายในท่านอนราบ, $k = 1$

3.4 ค่าแนะนำสำหรับผลกระทบจากการสั่นสะเทือนทางด้านความสบายและความสามารถในการรับรู้

ค่าการสั่นสะเทือนสัมบูรณ์ของค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราเร่งที่มีการถ่วงน้ำหนักที่ยอมรับได้สำหรับการสั่นสะเทือนที่ส่งผลทางด้านความสบายและความสามารถในการรับรู้มีรายละเอียดดังนี้

(1) ด้านความสบาย

$a_v < 0.315 \text{ m/s}^2$	ไม่รู้สึกละสบาย
$0.315 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 0.63 \text{ m/s}^2$	ไม่สบายเล็กน้อย
$0.5 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 1 \text{ m/s}^2$	ค่อนข้างไม่สบาย
$0.8 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 1.6 \text{ m/s}^2$	ไม่สบาย
$1.25 \text{ m/s}^2 \leq a_v \leq 2.5 \text{ m/s}^2$	ไม่สบายมาก
$a_v > 2 \text{ m/s}^2$	ไม่สบายมากที่สุด

(2) ความสามารถในการรับรู้

$a_v < 0.015 \text{ m/s}^2$	ไม่สามารถรับรู้ได้
-----------------------------	--------------------