การตรวจวัดระดับความสั่นสะเทือนจากการทำงาน

การประเมินความสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานที่เกิดขึ้นที่มือ-แขน หรือทั่วร่างกาย ที่มีผลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งเกิดจากการใช้เครื่องมือที่มีความสั่นสะเทือนชนิดต่างๆ เช่น หินเจียร ประแจลม สว่าน และเลื่อย เป็นต้น ความสั่นสะเทือนนี้อาจเกิดที่มือข้างเดียวหรือสองข้างแล้วส่งผ่านไปยังแขนและไหล่ ความสั่นสะเทือนอาจเกิดเป็นช่วงๆ หรืออาจเกิดต่อเนื่องที่อาจทำให้เกิดผลต่อระบบประสาท กล้ามเนื้อ กระดูก ข้อต่อและหลอดเลือด การประเมินความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่มือ โดยใช้เครื่องมือวัดความสั่นสะเทือนที่ประกอบด้วยตัวเครื่องวัด (Vibration Meter) และหัววัด (Transducer) ที่ระบุไว้ตามวิธีมาตรฐานของ ISO 8662 การวัดความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย เป็นการวัดเพื่อประเมินความสั่นสะเทือนที่อาจมีผลต่อสุขภาพ ต่อความรู้สึกสบาย ต่อการรับรู้ และการคลื่นไส้ เวียนศีรษะ ระดับความสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบที่เกิดจากความถี่อยู่สองช่วง คือ ช่วงความถี่ที่มีผลต่อสุขภาพ คือ 0.5-1.15 เมตรต่อวินาที^{2} และช่วงความที่ทำให้รู้สึกทำความไม่สบาย 9.1-21.0 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ โดยการวัดความสั่นสะเทือนของแกน x y และ z แต่ละแนวแกนแล้วปรับค่าเป็นค่าความสั่นสะเทือนที่ปรับด้วยค่าถ่วงน้ำหนักตามความถี่ที่มีผลต่อผู้ปฏิบัติแต่ละประเภทของงาน ด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของการประเมินผลที่มีต่อสุขภาพ ต่อความรู้สึกสบาย ต่อการรับรู้ และการคลื่นไส้เวียนศีรษะ มีค่าแตกต่างกัน

คำและบทนิยาม

ความสั่นสะเทือน (Vibration) คือ การแกว่งหรือการสั่นของวัตถุรอบๆ จุดสมดุล ซึ่งทางสุขศาสตร์อุตสาหกรรมจะกล่าวถึงวัตถุที่เคลื่อนไหวในลักษณะของของแข็ง เช่น เครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น เครื่องจักรหรือมอเตอร์ในอุตสาหกรรมทุกชนิดจะมีความสั่นที่บ่งบอกถึงสภาพของเครื่องจักร ถ้าค่าความสั่นที่วัดได้มีค่าสูง อาจมีสาเหตุมาจากเครื่องจักรเกิดความไม่สมดุล หรือมีชิ้นส่วนใดเคลื่อนหรือหลุดไปจากตำแหน่งปกติ ซึ่งจำเป็นต้องทำการบำรุงรักษาหากปล่อยให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างต่อเนื่องหรือรุนแรง อาจทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหายได้ โดยปกติเรามักจะแบ่งประเภทของความสั่นสะเทือนในลักษณะของการก่อให้เกิดผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน

ความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย (Whole Body Vibration; WBV) คือ ความสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านมาจากพื้นของสถานที่ทำงานหรือโครงสร้างของวัตถุมายังทุกส่วนของร่างกาย มีผลทำให้เกิดความผิดปกติต่อระบบการทำงานของร่างกายหลายระบบ

ความสั่นสะเทือนมือ-แขน (Hand-Arm Vibration; HAV) คือ ความสั่นสะเทือนที่ส่งผ่านมาเฉพาะที่ โดยมักจะเกิดขึ้นที่นิ้วมือและมือที่ต้องจับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีการสั่นสะเทือน เช่น เครื่องมือลม เลื่อยไฟฟ้า เครื่องเจาะ เครื่องเจียร เครื่องขัดผิว เป็นต้น ทำให้เกิดอาการผิดปกติของระบบหลอดเลือด ระบบประสาท ระบบกระดูกและกล้ามเนื้อ

องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐาน (International Organization for Standardization; ISO) ได้กำหนดเป็นข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทำงานกับความสั่นสะเทือน โดยพิจารณาจากองค์ประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง คือ ความแรงของความสั่นสะเทือน ความถี่ของความสั่นสะเทือน ทิศทางของการสั่นสะเทือน และระยะเวลาที่ได้รับสัมผัส

ความถี่ของการสั่นสะเทือน หมายถึง จำนวนรอบของการสั่นสะเทือนต่อหน่วยเวลา ซึ่งหน่วยที่นิยมใช้จะเป็น Cycle per Minutes (CPM)

ขนาดของการสั่นสะเทือน โดยทั่วไปแล้วหากขนาดของการสั่นสะเทือนมีขนาดใหญ่ย่อมหมายถึงเครื่องจักรเริ่มมีปัญหา โดยพารามิเตอร์หลักที่นิยมใช้ ได้แก่

การกระจัดหรือระยะเคลื่อนที่ (Displacement) คือ ระยะการเคลื่อนที่ของมวลจากจุดสมดุล ใช้เมื่อมีความถี่ต่ำ

ความเร็ว (Velocity) คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของมวล มักใช้ในการสำรวจเบื้องต้นหรือประเมินเบื้องต้น

ความเร่ง (Acceleration) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมวลในขณะที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา ใช้เมื่อความสั่นสะเทือนมีความถี่สูง

มุมเฟส จะเป็นค่าความแตกต่างของตำแหน่งชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนชิ้นหนึ่งเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหรือชิ้นส่วนที่มีการสั่นสะเทือนอีกชิ้นหนึ่ง มุมเฟสมีหน่วยเป็นองศา ใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมที่ใช้ประกอบการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ ทำให้สามารถบ่งบอกลักษณะความเสียหายได้ชัดเจนขึ้น

ค่ามาตรฐานความสั่นสะเทือน

ค่ามาตรฐานความสั่นสะเทือนสำหรับ เป็นตัวชีวัดเพื่อประเมินแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและก่อให้เกิดอันตรายต่อคนงาน ทั้งรูปแบบของแรงสั่นสะเทือนทั่วทั้งร่างกาย (Whole body vibration) และแรงสั่นสะเทือนเฉพาะมือ-แขน (Hand-Arm Vibration) จะทำให้สามารถประเมินระดับความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดโรคและปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการทำงานให้เหมาะสม ป้องกันการเกิดโรคจากการทำงานและอาการไม่สบายตัว รายละเอียดดังนี้

1. มาตรฐานความสั่นสะเทือนมือ-แขน

ค่ามาตรฐานความสั่นสะเทือนที่มือ-แขน มีการกำหนดไว้ในหลายองค์กร เช่น สมาคมนักสุขศาสตร์ของสหรัฐอเมริกา (The American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH) สถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American National Standards Institute; ANSI) และรัฐสภายุโรปกับสภาของสหภาพยุโรป (Directive 2002/44/EC of the European Parliament and the Council of the European Union) องค์กรทั้งสามแห่งนี้ มีมาตรฐานที่แตกต่างกัน ที่จะกล่าว

ต่อไปว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร ดังนั้น ในการเลือกใช้มาตรฐานจะต้องมีการอ้างอิงว่าใช้ขององค์กรใด สำหรับองค์กรมาตรฐานนานาชาติ (International Organization for Standardization; ISO) ไม่ได้ระบุมาตรฐานความสั่นสะเทือนที่มือไว้ใน ISO5349-1 เพียงแต่แสดงข้อมูลการเกิดอาการที่มือ-แขนน้อยมาก เมื่อได้รับความสั่นสะเทือนเท่ากับ เมตรต่อวินาที^{2} (ประมุข โอศิริ, 2554)

ค่ามาตรฐานของความสั่นสะเทือนที่มือ-แขน สมาคมนักสุขศาสตร์ของสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดมาตรฐานไว้ โดยมีความสัมพันธ์ของค่าความสั่นสะเทือนกับระยะเวลาทำงาน ในการเปรียบเทียบให้นำค่าสูงสุดที่วัดได้ของแกนใดแกนหนึ่งในสามแกน ไม่ว่าจะเป็นแกน x, y หรือ z มาเปรียบเทียบกับค่าในตาราง (ตารางที่ 9.1)

ตารางที่ 9.1 ค่ามาตรฐานความสั่นสะเทือนที่มือ-แขน ที่กำหนดโดย ACGIH

ระยะเวลาที่สัมผัสกับความสั่นสะเทือน	ความสั่นสะเทือน (เมตรต่อวินาที^{2})
4 ชม. และน้อยกว่า 8 ชม.	4
2 ชม. และน้อยกว่า 4 ชม.	6
1 ชม. และน้อยกว่า 2 ชม.	8
น้อยกว่า 1 ชม.	12

สำหรับค่ามาตรฐานของอีกสององค์กรนั้นมีความเหมือนกัน คือ เมื่อวัดความสั่นสะเทือนที่มือได้รับทั้งสามแกนคือแกน x, y และ z ให้รวมค่าความสั่นสะเทือนของทั้งสามแกนเข้าด้วยกัน โดยใช้สมการที่ (9.2) แล้วนำค่าที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดให้ผู้ปฏิบัติงานได้รับความสั่นสะเทือนเป็นเวลา 8 ชั่วโมงไว้สองระดับ คือ ระดับที่ต้องดำเนินการ (Daily exposure action value) มีค่าเท่ากับ 2.5 เมตรต่อวินาที^{2} กับ ระดับขีดจำกัด (Daily exposure limit value) มีค่าเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที^{2} ค่ามาตรฐานทั้งสองระดับนี้ Directive 2002/44/EC ไม่ได้ให้คำนิยามไว้ในมาตรฐาน แต่สถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมิกา (ANSI) S2.70-2006 ได้ให้คำนิยามไว้ดังนี้

2. มาตรฐานความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย

Directive 2002/44/EC of the European Parliament and the Council กำหนดค่าที่ต้องดำเนินการป้องกันเบื้องต้น (Action Level) และค่าขีดจำกัดสูงสุด (Limit Level) และค่าสัมผัสการสั่นสะเทือนสะสม (Vibration Dose) ดังตารางที่ 9.2

ISO 2631:1997 Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Huma Exposure to Whole Body Vibration กำหนดมาตรฐานระดับความสบาย ดังนี้ (ตารางที่ 9.3)

ตารางที่ 9.2 การป้องกันเบื้องต้นและค่าขีดจำกัดสูงสุด (Directive 2002/44/EC)

8-Hour Daily Exposure Limit	Action Level	Limit Level
Whole Body. A(8)	0.5 m/s^2	1.15 m/s^2
Whole Body (Vibration Dose), VDV_{exp}	9.1 $m/s^{1.75}$	21.0 $m/s^{1.75}$

ที่มา: ปริยาภรณ์ โทนหงส์สา และคณะ, (2555 น.68)

ตารางที่ 9.3 ระดับความสั่นสะเทือนและผลกระทบ (ISO 2631:1997)

ค่าความสั่นสะเทือนจาก 3 แกน $a_v(m/s^2)$	ระดับความสั่นสะเทือนกระทบ
<0.315 m/s^2	ปกติ
0.315-0.63 m/s^2	มีความไม่สบายเล็กน้อย
0.5-1 m/s^2	มีความไม่สบายปานกลาง
0.8-1.6 m/s^2	มีความไม่สบาย
1.25-2.5 m/s^2	มีความไม่สบายมาก
>2 m/s^2	มีความไม่สบายอย่างรุนแรง

ที่มา: ปริยาภรณ์ โทนหงส์สา และคณะ, (2555 น.68)

ผลกระทบของระดับความสั่นสะเทือนต่อสุขภาพ

ความสั่นสะเทือนอาจเกิดเป็นช่วงๆ หรืออาจเกิดต่อเนื่องที่อาจทำให้เกิดผลต่อระบบประสาท กล้ามเนื้อ กระดูก ข้อต่อและหลอดเลือด กลไกที่ทำให้เกิดความผิดปกติของร่างกายจากความสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ ความสั่นสะเทือนที่เกิดในแต่ละแนวแกนจะต้องมีการถ่วงน้ำหนักในแต่ละความถี่ของความสั่นสะเทือนในแต่ละแนวแกนซึ่งจะมีค่าต่างกันออกไป เพราะแต่ละความถี่มีผลต่อสุขภาพที่แตกต่างกันในด้านต่างๆ เช่น มีผลต่อสุขภาพ ความรู้สึกสบาย การรับรู้ การคลื่นไส้เวียนศีรษะ จากการศึกษาด้านระบาดวิทยาของ NIOSH พบว่าการสัมผัสความสั่นสะเทือนเป็นเวลานานมีความสัมพันธ์ต่อความผิดปกติของร่างกาย ซึ่งแบ่งตามลักษณะการสัมผัสออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. อันตรายจากความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย (Whole Body Vibration)

การได้รับความสั่นสะเทือนที่เกิดในแนวแกน X, Y, Z ส่งผลกระทบทั้งร่างกาย แตกต่างกันตามความเร่งและระยะเวลาการสัมผัสซึ่งอาการที่เกิดขึ้น ได้แก่

1.1 อาการเมาคลื่น (Morning sickness) เป็นความผิดปกติของระบบการควบคุมการทรงตัวของร่างกายทำให้ผู้ป่วยมีอาการมึนงง คลื่นไส้ อาเจียน

1.2 ความผิดปกติชั่วคราวของสายตา เกิดจากการรบกวนการทำงานของกล้ามเนื้อตา ทำให้มีอาการตาพร่า มองภาพไม่ชัด

1.3 ความผิดปกติของระบบหมุนเวียนโลหิต เกิดจากการที่ความดันโลหิตและชีพจรสูงขึ้น และเลือดไปเลี้ยงสมองลดลงทำให้เกิดอาการมึนศีรษะ

1.4 อันตรายต่อระบบการหายใจ ทำให้อัตราการหายใจเร็วขึ้น เกิดอาการ Hyper ventilation เกิดการคั่งของ Oxygen ในกระแสเลือดและปริมาณ Carbon dioxide ต่ำลง เป็นผลให้เกิดอาการตาพร่ามั่ว ชาปลายมือ ปลายเท้า

1.5 อันตรายต่อระบบการกำหนดรู้ (Orientation system) การกำหนดรู้ตำแหน่งของร่างกายและวัตถุที่สัมผัสอาศัยการประสานงานของสมองและระบบประสาทควบคุมการสัมผัสทางกาย หู และตา เมื่อร่างกายรับความสั่นสะเทือนที่ความถี่ประมาณ 2 Hz ในช่วงระยะเวลาหนึ่งจะทำให้การประสานงานของระบบดังกล่าวเสียไป ผู้ป่วยเสียความสามารถในการระบุตำแหน่งของวัตถุและร่างกายตามความเป็นจริงชั่วคราว

1.6 อันตรายต่อระบบกล้ามเนื้อและกระดูก ความสั่นสะเทือนในช่วงความถี่สูงตั้งแต่ 10 ถึงมากกว่า 200 Hz มีผลทำให้กล้ามเนื้อมีความเครียดและเกร็งตัวมากขึ้น อาจทำให้เกิดความพิการของกระดูกสันหลังในกรณีที่รับความสั่นสะเทือนเป็นเวลานาน

1.7 อันตรายต่ออวัยวะภายใน ถ้าความถี่ของการสั่นสะเทือนตรงกับ Natural frequency ของอวัยวะภายใน จะเกิดปรากฏการสสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งจะทำให้อวัยวะภายในบวมช้ำและฉีกขาดได้

1.8 Vibration sickness เป็นอาการรวมของกลุ่มคนที่สัมผัสความสั่นสะเทือนเป็นเวลานานๆ ทำให้ผู้ป่วยมีความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร เช่น แผลในกระเพาะอาหารและการขับถ่ายผิดปกติ ความคมชัดของการมองเห็นเสื่อม มีความผิดปกติของการทำงานของ Labyrinth ร่วมกับอาการปวดกล้ามเนื้อ มีการเดินเซ

2. อันตรายจากความสั่นสะเทือนมือ-แขน (Hand-Arm Vibration)

อันตรายจากความสั่นสะเทือนมือ-แขน หรือเกิดขึ้นในส่วนที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการทำงานและสัมผัสผ่านเครื่องมือที่ใช้ในการทำงาน ได้แก่ เครื่องสกัด เครื่องเจาะ เครื่องเจียร เป็นต้น ซึ่งอาการที่มักพบบ่อยในกลุ่มคนงาน ได้แก่

2.1 โรคนิ้วซีดจากความสั่นสะเทือน (Vibration White Finger หรือ Dead Man’s Hand) ในปัจจุบันนิยมเรียกว่า Hand Arm Vibration Syndrome (HAVS) เกิดจากการจับเครื่องมือที่มีความสั่นสะเทือนแน่นเกินไป การงอนิ้วอย่างต่อเนื่อง และการทำงานในที่ที่อากาศเย็น ทำให้เกิดความผิดปกติของระบบไหลเวียนโลหิตมีผลทำให้นิ้วซีด เกิดความผิดปกติของประสาทรับความรู้สึกและประสาทควบคุมกล้ามเนื้อ มีอาการชา ไม่สามารถแยกจุดสัมผัสได้ เกิดความผิดปกติของระบบกล้ามเนื้อและโครงกระดูก ข้อต่ออักเสบ เกิดถุงน้ำบริเวณข้อต่อ

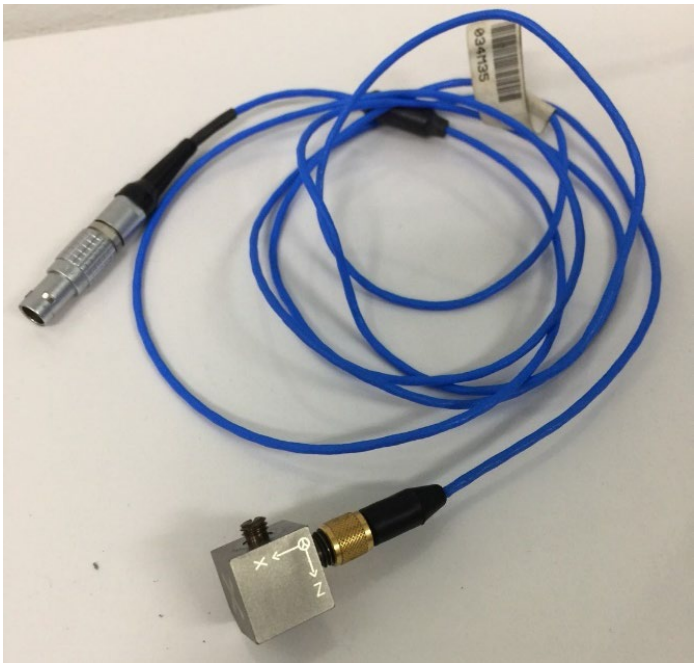
2.2 Carpal Tunnel Syndrome เป็นโรคที่เกิดจากการถูกกดที่เส้นประสาทบริเวณข้อมือ ทำให้มีอาการปวดชาที่ปลายมือ โดยทั่วไปสาเหตุมักเกิดจากการงอและกระตุกข้อมือซ้ำๆ กันเป็นเวลานาน แต่จากการทดลองในสัตว์ทดลองพบว่าความสั่นสะเทือนทำให้เกิดอาการบวมของเส้นประสาท ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการกดทับเส้นประสาทที่ร่องข้อมือ

2.3 โรคประสาทหูเสื่อม การรับสัมผัสความสั่นสะเทือนทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อของเส้นเลือดที่ไปเลี้ยงหูชั้นใน

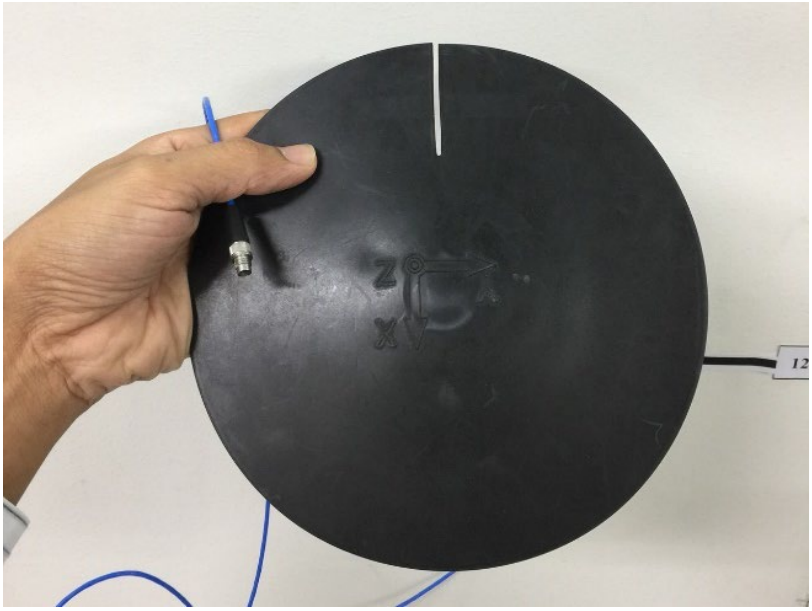
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ประเมินความสั่นสะเทือน

ใช้เครื่องมือวัดความสั่นสะเทือนที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 8041: 2005 ที่มีส่วนประกอบของเครื่องวัดคือหัววัด ที่มีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานในภาพของความสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้า กระบวนการส่งสัญญานและจอภาพ ที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของความสั่นสะเทือนที่เกิดกับคน สำหรับเครื่องมือที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปจะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ตัวเครื่องที่มีจอแสดงผลการตรวจวัด โดยมีช่องเสียบสำหรับหัวต่อสายวัด สำหรับเครื่องวัดความสั่นสะเทือนมือและแขนหัววัดออกแบบมาให้ติดตั้งติดกับอุปกรณ์จับยึดที่เหมาะสมกับเครื่องมือต่างๆ เช่น สว่าน เครื่องเลื่อย เครื่องเจียร เป็นต้น (ภาพที่ 9.1-9.2) ส่วนหัววัดความสั่นสะเทือนทั้งลำตัวออกแบบมาลักษณะแผ่นแบนให้สามารถนั่งทับ พิง หรือเหยียบได้ (ภาพที่ 9.3)

ภาพที่ 9.1 ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดความสั่นสะเทือน
ที่มา: ห้องปฏิบัติการ 4257, (2560)



ภาพที่ 9.2 การติดตั้งสายสัญญาณกับหัววัดสำหรับมือแขน-
ที่มา: ห้องปฏิบัติการ 4257, (2560)



ภาพที่ 9.3 แผ่นสำหรับวัดความสั่นสะเทือนทั้งลำตัวในท่านั่ง
ที่มา: ห้องปฏิบัติการ 4257, (2560)

1. คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องวัดความสั่นสะเทือน

ด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัยปัจจุบันเครื่องวัดความสั่นสะเทือนถูกผลิตให้เพิ่มความสามารถในการตรวจวัด วิเคราะห์ ได้แก่ สามารถเก็บข้อมูลได้แบบ Manual และ Programmed สามารถถ่ายโอนข้อมูลจากหน่วยความจำในตัวเครื่องไปบันทึกไว้ในอุปกรณ์วิเคราะห์และประมวลผล สามารถวิเคราะห์ผลได้ตามพารามิเตอร์หลายหลายตามความต้องการ ทั้งนี้คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องวัดความสั่นสะเทือนโดยทั่วไปมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ระบบจะสามารถตรวจวัดความสั่นสะเทือนและบันทึกข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องและเป็นเวลานานได้ สามารถวัดได้ทั้งความเร็ว ความถี่ ความเร่งของแนวแกน x, y, z

1.2 รองรับ Frequency weighting แบบ คือ Wd ,Wh และ Wk

1.3 มีช่วงการตรวจวัดความสั่นสะเทือนแบบทั้งร่างกายอยู่ในช่วง 1–80 Hz และแบบที่แขนและมืออยู่ในช่วง 8–1,000 Hz

1.4 สามารถแสดงค่าผลการตรวจวัดความสั่นสะเทือนเป็นค่าความเร่ง (a) ชนิด Instantaneous (w), Root mean square (rms) และ Peak แบบ Real time ได้ 3 แกน (x,y,z) หรือมากกว่า ในหน่วยของ m/s^2 หรือ mm/s^2

1.5 มีหัววัดความสั่นสะเทือนแบบทั้งร่างกายที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 2631-1:1997 (Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole body vibrations Part 1: General requirements) โดยมี Voltage sensibility 100 mV/g หรือ ดีกว่า และทำงานได้ดีเมื่อวัดความสั่นสะเทือนในช่วงความถี่ 1–80 Hz พร้อมสายสัญญาณเชื่อมต่อกับเครื่องวัดความสั่นสะเทือน

1.6 มีหัววัดความสั่นสะเทือนแบบที่มือและแขนที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 5349-1:2001 (Mechanical vibration Measuring and evaluation of the development of vibrations on the hand-arm-system of human Part 1: General requirements) โดยมี Voltage sensibility 10 mV/g หรือดีกว่า และทำงานได้ดีเมื่อวัดความสั่นสะเทือน ในช่วงความถี่ 1-1000 Hz พร้อมสายสัญญาณเชื่อมต่อกับเครื่องวัดความสั่นสะเทือน

1.7 มีชุดอุปกรณ์ยึดจับหัววัดเข้ากับแขนและมือตามลักษณะการทำงานต่างๆ เช่น ชนิดที่ใช้ยึดติดกับนิ้วมือ ชนิดที่ใช้ยึดติดกับแขน

1.8 สามารถวิเคราะห์ Vibration daily expose (A(8)) ตาม Directive 2002/44/EC สามารถวิเคราะห์ค่า Maximum transient vibration (MTVV), Vibration dose value (VDV), Vibration total value (ahv) และค่า Equivalent vibration value (ahv,eq) สามารถวิเคราะห์ข้อมูล a, aw และ arms ในรูปแบบกราฟเทียบกับเวลา

1.9 สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ และที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง

1.10 สามารถถ่ายโอนข้อมูลจากหน่วยความจำในตัวเครื่องไปบันทึกไว้ในอุปกรณ์วิเคราะห์และประมวลผลได้ เครื่องใช้งานนานๆ ได้ ขนาดกะทัดรัด และพกพาได้สะดวก

2. ส่วนประกอบเครื่องวัดความสั่นสะเทือน (Vibration Meter)

เครื่องวัดความสั่นสะเทือนมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน คือ ตัวรับสัญญาณ เครื่องขยายสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์ความสั่นสะเทือน และเครื่องบันทึกความสั่นสะเทือน มีรายละเอียดดังนี้

2.1 ตัวรับสัญญาณ ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งการเคลื่อนที่ ความเร็ว และความเร่ง แต่ที่นิยมใช้คือความเร่ง ภายในตัวรับสัญญาณจะบรรจุ Piezoelectric Element ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกแร่อัดแน่นอยู่ จะเกิดประจุไฟฟ้าเมื่อมีความสั่นสะเทือนเกิดขึ้น

2.2 เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) มีหน้าที่ขยายสัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับจากตัวรับสัญญาณ

2.3 เครื่องวิเคราะห์ความสั่นสะเทือน (Analyzer) จะทำการตรวจวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้าที่ได้รับการขยายสัญญาณแล้วออกมาเป็นค่าต่างๆ

2.4 เครื่องบันทึกความสั่นสะเทือน (Vibration Recorder) จะทำการบันทึกและแปลผลการตรวจวัด ซึ่งอาจจะแสดงเป็นตัวเลขหรือเป็นเข็มชี้บนหน้าปัด

การสอบเทียบเครื่องมือประเมินระดับความสั่นสะเทือน

การสอบเทียบเครื่องมือวัด (Calibration) เป็นกระบวนการหนึ่งในการใช้เครื่องวัดความสั่นสะเทือนที่ใช้สร้างความมั่นใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้งานอยู่นั้น ยังคงมีคุณภาพและมาตรฐานถูกต้องเหมาะสมแก่การนำไปใช้งานในกระบวนการวัด เพื่อนำไปสู่ผลลัพธ์สุดท้ายก็คือการวิเคราะห์ผลออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพตามมาตรฐานที่กำหนด โดยการสอบเทียบเครื่องมือวัดกับค่ามาตรฐานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่สามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติ หรือมาตรฐานระหว่างชาติได้ โดยในการสอบเทียบเครื่องมือวัด จะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) ด้วยทุกครั้ง ในปัจจุบันทุกมาตรฐานสากลจะมีข้อกำหนดที่กล่าวถึงการสอบเทียบเครื่องมือวัดทั้งสิ้น เช่น ISO 9000, ISO 14000, ISO/TS 16949, มอก.18000 เป็นต้น

1. การส่งสอบเทียบห้องปฏิบัติการ

ข้อควรพิจารณาเมื่อสอบเทียบเครื่องมือประเมินระดับความสั่นสะเทือน กรณีส่งเครื่องมือไปสอบเทียบของห้องปฏิบัติการสอบเทียบมีมาตรฐานดังนี้

1.1 ห้องปฏิบัติการได้รับการรับรองมาตรฐานสากล ISO/IEC 17025:2005

1.2 เครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานจากยุโรปและอเมริกา สามารถสอบกลับถึงมาตรฐานนานาชาติ (Traceability) เช่น NIST, NIMT, PTB, BIPM, OFMET, NMI เป็นต้น

1.3 บุคลากรที่ทำการสอบเทียบมีทักษะประสบการณ์และประวัติการฝึกอบรมอย่างสมบูรณ์เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2005

2. การสอบเทียบก่อนการตรวจวัด

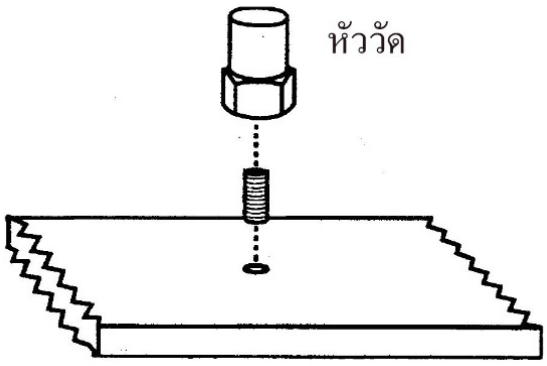
ในการสอบเทียบเครื่องมือและอุปกรณ์เกี่ยวกับความสั่นสะเทือนจะทำการปรับความถูกต้องตามมาตรฐานปฐมภูมิด้วย Laser Interferometer ที่จะทำการสอบเทียบหัววัดความเร่ง (Accelerometer) ในช่วงความถี่ 50–50,000 Hz

การติดหัววัดความสั่นสะเทือน

การติดหัววัดความสั่นสะเทือนจะต้องเป็นตำแหน่งที่มือจับด้าม หรือเป็นตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดที่มือจับ หรือเป็นตำแหน่งที่ความสั่นสะเทือนเข้าสู่ร่างกาย โดยปกติจะต้องติดหัววัดไว้ที่กึ่งกลางของด้ามจับ โดยต้องพิจารณาความสะดวกในการทำงานของผู้ปฏิบัติงานด้วย หัววัดบางรุ่นมีขนาดเล็กสามารถติดไว้ระหว่างอุ้งมือกับด้ามจับได้ ในการวัดความสั่นสะเทือนที่ด้ามจับ บางกรณีได้ค่าไม่ใกล้เคียงกัน เช่น การวัดที่ด้ามด้านในใกล้กับเครื่องมือและด้ามด้านนอกที่ห่างจากเครื่องมือ อาจให้ความสั่นสะเทือนไม่เท่ากัน ดังนั้นจะต้องใช้หัววัดสองหัวและวัดทั้งสองตำแหน่งแล้วมาหาค่าเฉลี่ย การติดหัววัดกับพื้นผิวที่มีความสั่นสะเทือนจะมีผลต่อการวัด ถ้าหัววัดมีมวลมากก็จะส่งผลกระทบทำให้ค่าที่วัดได้มาก ดังนั้นหัววัดควรมีมวลน้อยๆ โดยปกติแล้วหัววัดควรมีมวลน้อยกว่าร้อยละของเครื่องมือที่ต้องการวัด หรือร้อยละของด้ามมือจับของเครื่องมือ การวัดให้ได้ค่าที่เป็นความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นแล้วเข้าสู่ร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน ที่จะต้องใช้วิธีการติดหัววัดให้เหมาะสมกับบริเวณที่มือจับแตกต่างกันไป ดังต่อไปนี้

1. การติดโดยใช้สลักเกลียว

ในกรณีที่ตำแหน่งที่ต้องการวัดมีรูเกลียวสำหรับสลักเกลียวก็สามารถใช้สลักเกลียวหมุนเข้าไปในรูเกลียวที่อีกด้านหนึ่งของสลักเกลียวให้หมุนเข้าไปในรูเกลียวของหัววัดดัง (ภาพที่ 9.4)



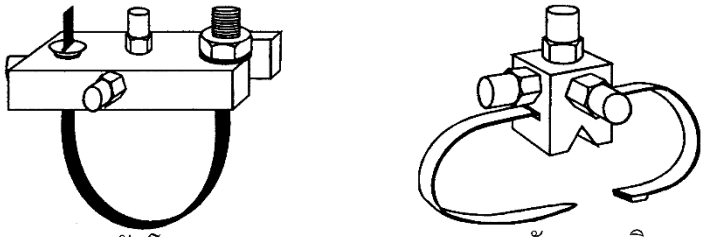
ภาพที่ 9.4 การติดโดยใช้สลักเกลียว
ที่มา: ประมุข โอศิริ, (2553 น.14)

2. การติดโดยใช้กาวหรือซีเมนต์

การใช้กาวหรือซีเมนต์ติดกับหัววัดที่ต้องใช้สลักเกลียวที่มีแผ่นเรียบที่สัมผัสกับผิวที่สั่นสะเทือน แล้วใช้กาวทาระหว่างแผ่นที่ติดกับสลักเกลียวกับด้ามจับ เพื่อหลีกเลี่ยงที่จะใว้กาวติดกับหัววัดโดยตรง ไม่ควรใช้กาวที่อ่อนตัวหรือขี้ผึ้ง เพราะจะติดกันไม่แน่นทำให้การตอบสนองต่อความถี่ที่ต้องการวัดไม่ดี

3. การติดด้วยสายรัด

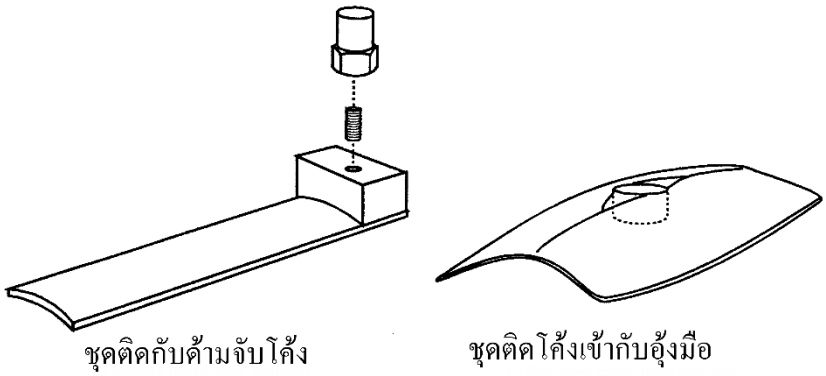
หัววัดติดกับชุดสายรัดที่จะรัดกับด้ามจับหรือเครื่องมือที่สั่นสะเทือน สายรัดอาจเป็นโลหะ หรือไนล่อนก็ได้ ดังแสดงใน (ภาพที่ 9.5)



ภาพที่ 9.5 การติดด้วยสายรัด
ที่มา: ประมุข โอศิริ, (2553 น.15)

4. การติดด้วยชุดด้ามจับ

ในกรณีที่ไม่สามารถใช้การติดชุดวัดกับด้ามมือจับด้วยวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วเพราะด้ามจับของอุปกรณ์หลายๆ ชนิดมีความโค้งเพื่อให้เหมาะกับมือ หรือด้ามจับของเครื่องมือที่บุไว้ด้วยวัสดุที่นิ่ม ดังนั้นจึงมีข้อแนะนำให้ผู้ปฏิบัติกำด้ามจับอย่างหลวมๆ เมื่อใช้เทปกาวติดชุดหัววัด ในกรณีที่ด้ามมือจับเป็นทรงโค้งทำให้ติดตั้งหัววัดยาก จึงต้องสร้างชุดติดตั้งที่มีลักษณะโค้งตามให้เข้ากับอุ้งมือ (ภาพที่ 9.6)



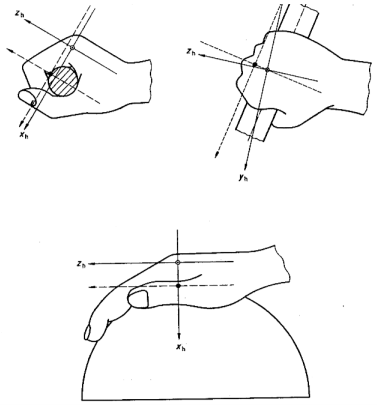
ภาพที่ 9.6 การติดด้วยชุดด้ามจับ
ที่มา: ประมุข โอศิริ, (2553 น.16)

การประเมินความสั่นสะเทือนที่มือ-แขน

การประเมินความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่มือ-แขน โดยใช้เครื่องมือวัดความสั่นสะเทือน ที่ประกอบด้วยตัวเครื่องวัดและหัววัดคือ Transducer ที่มีการเปลี่ยนพลังงานภาพแบบหนึ่งไปเป็นอีกภาพแบบหนึ่ง เช่น เปลี่ยนพลังงานที่เป็นความสั่นสะเทือนหรือความดันเป็นพลังงานไฟฟ้า ในการวัดให้ติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนที่ด้ามมือจับ ที่ระบุไว้ตามวิธีมาตรฐานของ ISO 8662 และนำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานความสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ได้จากการอ้างอิงผลของการศึกษาที่พบค่าระดับของความสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดนิ้วซีดขาวประมาณร้อยละ 10 ของผู้ปฏิบัติงานกับความสั่นสะเทือน อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนถึงกลไกที่ทำให้เกิดความผิดปกติของร่างกายจากความสั่นสะเทือนในแต่ละช่วงความถี่ ในการประเมินความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่มือนั้นจะประเมินจากปัจจัยต่างๆ คือระดับความสั่นสะเทือน ช่วงของความถี่ที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือ และระยะเวลาที่ผู้ปฏิบัติได้รับความสั่นสะเทือน ในที่นี้จะทำการประเมินความสั่นสะเทือนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับในระยะเวลาปฏิบัติงานนาน 8 ชั่วโมง ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 5349 มีขั้นตอนการประเมินดังนี้

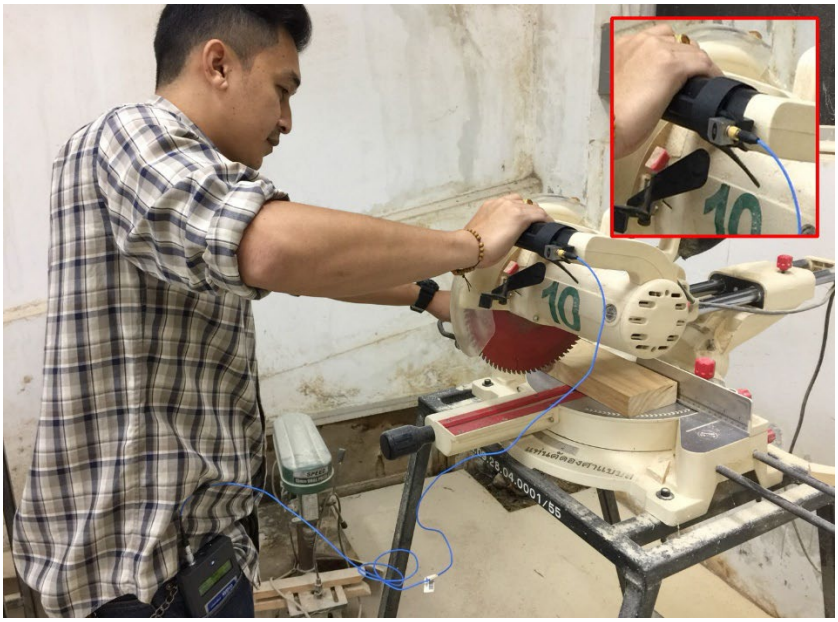
1. วิธีการวัดความสั่นสะเทือนที่มือ-แขน

ในการวัดความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่มือ-แขนต้องพิจารณาตำแหน่งที่จะทำการวัดความสั่นสะเทือนที่มือ และพิจารณาทิศทางของความสั่นสะเทือนว่าเกิดที่แนวแกน x, y หรือ z ที่ทั้งสามแกนนี้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน (ภาพที่ 9.7) แสดงด้ามที่มือจับมีลักษณะเป็นทรงกระบอก และเป็นทรงกลม ที่ต้องทำการวัดตรงตำแหน่งที่มือจับที่ตรงกึ่งกลาง จากหลักการที่ได้แสดงใน (ภาพที่ 9.7) สามารถนำมาใช้ในการประเมินความสั่นสะเทือนที่เกิดจากเครื่องมือที่มีภาพร่างของด้ามแตกต่างกัน แสดงใน (ภาพที่ 9.8-9.10) ที่แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนที่ด้ามจับของเครื่องมือแต่ละชนิด เช่น เครื่องจิ๊กซอว์ เครื่องตัดชนิดปรับองศา และเครื่องเจียร



ภาพที่ 9.7 แสดงด้ามที่มือจับมีลักษณะเป็นทรงกระบอกและเป็นทรงกลม
ที่มา: ประมุข โอศิริ, (2553 น.7)

ภาพที่ 9.8 การติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนที่ด้ามจับของเครื่องเลื่อยจิ๊กซอว์
ที่มา: ห้องปฏิบัติการ 4257, (2560)



ภาพที่ 9.9 การติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนที่ด้ามจับของเครื่องตัดชนิดปรับองศา
ที่มา: ห้องปฏิบัติการ 4257, (2560)

ภาพที่ 9.10 การติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนที่ด้ามจับของเครื่องเจียร
ที่มา: ห้องปฏิบัติการ 4257, (2560)

ในการประเมินความสั่นสะเทือนที่ใช้ความถี่มาเกี่ยวข้องกับการประเมิน ที่ต้องปรับค่าความสั่นสะเทือนที่ถ่วงน้ำหนักตามความถี่ ดังแสดงในตารางที่ 9.4 เพราะความถี่ต่ำๆ จะมีผลต่อสุขภาพมากกว่าความถี่สูงๆ เช่นที่ความถี่ 12.5 เฮิรตซ์ มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.958 หมายความว่า ถ้าวัดความสั่นสะเทือนได้เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที^{2} แต่มือของผู้ปฏิบัติงานจะรับความสั่นสะเทือนเท่ากับ 0.958 เมตรต่อวินาที^{2} สำหรับในที่นี้ใช้ความถี่ในช่วง 6.3 ถึง 1250 เฮิรตซ์ ของการแบ่งความถี่แบบ 1/3 ของแถบความถี่ (One-third-octave band frequencies) ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความสั่นสะเทือนที่ปรับค่าถ่วงน้ำหนักตามความถี่ได้จากสมการที่ (9.1) โดยปกติแล้วเครื่องวัดความสั่นสะเทือนจะมีฟังชั่นในเครื่องให้เลือกวัดค่าที่ปรับค่าถ่วงน้ำหนักแล้ว (a_{hw})

$$a_{hw}=\sqrt{\sum_i (W_{hi}a_{hi})^2} \qquad \text{..... (9.1)}$$

เมื่อ

a_{hw} เป็นความเร่งของรากที่สองที่ปรับค่าความถี่ (ถ่วงน้ำหนัก) มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที^{2}

W_{hi} เป็นค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนักของความถี่ในช่วงนั้นๆ

a_{hi} เป็นความเร่งของรากที่สองของค่าเฉลี่ยยกกำลังสอง ของความถี่ช่วงนั้นๆ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ^{2}

การประเมินในกรณีที่เกิดความสั่นสะเทือนจากทิศทางหลายๆ แกน เช่น การใช้สว่านเจาะคอนกรีต ให้ทำการวัดความสั่นสะเทือนในทุกแกน และปรับค่าความสั่นสะเทือนที่ถ่วงน้ำหนักตามความถี่ที่มีผลต่อมือ เมื่อได้ค่าระดับความสั่นสะเทือนทั้งสามแกนแล้วให้นำมาคำนวณรวมดังสมการที่ (9.2)

$$a_{hv}=\sqrt{a_{hwx}^2+a_{hwy}^2+a_{hwz}^2} \quad \text{.....(9.2)}$$

เมื่อ

a_{hv} เป็นค่าความสั่นสะเทือนรวม (ความเร่ง)

a_{hwx},a_{hwy},a_{hwz} เป็นค่าความสั่นสะเทือนตามแนวแกน x, y และ z

ตารางที่ 9.4 แสดงค่าแฟกเตอร์การปรับค่าความถี่ (ความถี่ถ่วงน้ำหนัก)

กึ่งกลางความถี่ (เฮิรตซ์) Nominal mid frequency (Hz)	แฟกเตอร์ Weighted factor (W_{hi})	กึ่งกลางความถี่ (เฮิรตซ์) Nominal mid frequency (Hz)	แฟกเตอร์ Weighted factor (W_{hi})
4	0.375	100	0.160
5	0.545	125	0.127
6.3	0.727	160	0.101
8	0.873	200	0.0799
10	0.951	250	0.0634
12.5	0.958	315	0.0503
16	0.896	400	0.0398
20	0.782	500	0.0314
25	0.647	630	0.0245
31.5	0.519	800	0.0186
40	0.411	1000	0.0135
50	0.324	1250	0.00894
63	0.256	1600	0.00536
80	0.202	2000	0.00295

ดังนั้นควรวัดความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นทั้งสามแกน แต่บางกรณีไม่สามารถวัดความสั่นสะเทือนได้ทั้งสามแกน ให้ใช้ค่าที่วัดได้จากแกนใดแกนหนึ่งแล้วคูณด้วยค่าแฟกเตอร์ระหว่าง 1.0 ถึง 1.7 การเลือกใช้ค่าแฟกเตอร์เท่ากับ 1.0 ใช้เมื่อระดับความสั่นสะเทือนของแกนใดแกนหนึ่งมีค่าสูงมากกว่าระดับความ

สั่นสะเทือนที่เกิดจากแกนอื่นๆ ที่มีระดับความสั่นสะเทือนน้อยกว่าร้อยละ 30 (หรือเท่ากับ0.3) ของระดับความสั่นสะเทือนที่มีค่าสูง ($a_{hw,dominant}$) แสดงการคำนวณค่าแฟกเตอร์ได้ดังสมการ (9.3)

$$a_{hv}=\sqrt{a^2_{hw,dominant}+(0.3a_{hw,dominant})^2+(0.3a_{hw,dominant})^2} \quad \text{.....(9.3)}$$
$$=\sqrt{1+2x0.3^2}a_{hw,dominant}$$
$$=1.086a_{hw,dominant}$$

ค่าที่ได้คือ 1.086 หรือเท่ากับ 1.1 ที่เป็นค่าแฟกเตอร์ที่ใช้สำหรับคูณกับผลที่ได้จากการวัดระดับความสั่นสะเทือนของแกนใดแกนหนึ่งที่มีค่าสูงกว่าอีกสองแกนมาก ซึ่งเกือบจะไม่มีผลกับค่าที่วัดได้สูงสุดของแกนใดแกนหนึ่ง

สำหรับค่าแฟกเตอร์ 1.7 จะใช้เมื่อค่าระดับความสั่นสะเทือนทั้งสามแกนมีค่าใกล้เคียงกัน หรือผู้ปฏิบัติงานทำงานที่ต้องมีการเคลื่อนที่เปลี่ยนทิศทางอยู่ตลอดเวลา จะใช้ค่าแฟกเตอร์เท่ากับ 1.7 ที่สามารถแสดงการคำนวณค่าแฟกเตอร์นี้จากสมการ (9.4)

$$a_{hv}=\sqrt{a^2_{hw,measured}+a^2_{hw,measured}+a^2_{hw,measured}} \quad \text{.....(9.4)}$$
$$=\sqrt{3}a_{hw,measured}$$
$$=1.73a_{hw,measured}$$

ค่าที่ได้คือ 1.73 หรือ 1.7 นำไปใช้ในการคูณกับค่าความสั่นสะเทือนที่วัดได้จากแกนหนึ่งแกนใด ดังนั้นจะใช้ค่าแฟกเตอร์ 1.1 หรือ 1.7 ได้ต่อเมื่อทราบว่า ค่าความสั่นสะเทือนจากอีกสองแกนมีค่าประมาณเท่าไร เมื่อวัดไม่ได้แล้วจะทราบได้อย่างไรว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30 หรือมีค่าความสั่นสะเทือนทั้งสามแกนมีค่าใกล้เคียงกัน สิ่งที่ทำได้คือจากการศึกษาข้อมูลเก่าการแหล่งข้อมูลอื่นๆ หรือจากการทำการทดลองให้เหมือนกับสภาพงานจริงที่สามารถวัดค่าความสั่นสะเทือนได้ทั้งสามแกน

2. ระยะเวลาที่ได้รับความสั่นสะเทือน

ในการประเมินความสั่นสะเทือนให้ประเมินเทียบกับระยะเวลาในการทำงานนาน 8 ชั่วโมง ถ้าได้ความสั่นสะเทือนน้อยกว่า 8 ชั่วโมงให้คิดเทียบค่าเป็น 8 ชั่วโมง จากสมการที่ (9.5)

$$A(8)=a_{hw}\sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad \text{.....(9.5)}$$

เมื่อ

A(8) เป็นค่าความสั่นสะเทือนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับในหนึ่งวัน (8 ชั่วโมง)

T เป็นระยะเวลาที่ได้รับความสั่นสะเทือนในขณะทำงาน

T_0 เป็นเวลาที่ทำงานอ้างอิงที่ 8 ชั่วโมง

ในกรณีที่งานในแต่ละงานที่ผู้ปฏิบัติทำนั้นได้รับความสั่นสะเทือนไม่เท่ากัน อาจเป็นเพราะผู้ปฏิบัติงานทำอยู่หลายแผนก หรือใช้เครื่องมือหลายชนิดในการทำงาน ให้คำนวณความสั่นสะเทือนรวมกันจากสมการที่ (9.6)

$$A(8)=\sqrt{\frac{1}{T_0}\sum_{i=1}^{n} a_{hvi}^2 T_i} \quad \text{.....(9.6)}$$

เมื่อ

a_{hvi} เป็นค่าความสั่นสะเทือนรวมสำหรับงานหนึ่งๆ

ตัวอย่าง ผู้ปฏิบัติงานใช้เลื่อยยนต์เลื่อยต้นไม้แต่ละต้นใช้เวลา 2 นาที ทำงานนาน 1 ชั่วโมง วัดความสั่นสะเทือนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับหลายๆ ค่าแล้วมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6 เมตรต่อวินาที^{2} ดังนั้นสามารถคำนวณหาความสั่นสะเทือนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับใน 8 ชั่วโมง A(8) ได้ ดังต่อไปนี้

$$A(8)=6\sqrt{\frac{1}{8}}=2.1 \quad m/s^2$$

สรุป ผู้ปฏิบัติงานใช้เลื่อยยนต์ได้รับความสั่นสะเทือนเทียบกับเวลาทำงานนาน 8 ชั่วโมง เท่ากับ 2.1 เมตรต่อวินาที^{2}

ตัวอย่าง ผู้ปฏิบัติงานได้รับความสั่นสะเทือนในชั่วโมงแรกเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที^{2} ต่อมาอีก 3 ชั่วโมงได้ 3.5 เมตรต่อวินาที^{2} และช่วงสุดท้ายอีก 0.5 ชั่วโมงได้ 10 เมตรต่อวินาที^{2} ดังนั้นสามารถคำนวณความสั่นสะเทือนรวมได้ ดังต่อไปนี้

$$A(8)=\sqrt{\frac{1}{8h}\left[\left(2m/s^2\right)^2\times 1h+\left(3.5m/s^2\right)^2\times 3h+\left(10m/s^2\right)^2\times 0.5h\right]}$$

$$=3.4 \quad m/s^2$$

สรุป ผู้ปฏิบัติงานได้รับความสั่นสะเทือนในสามช่วงเวลา รวมเท่ากับ 1+3+0.5 = 4.5 ชั่วโมง แต่ในการเปรียบเทียบกับมาตรฐานในเวลาทำงานให้คิดที่ 8 ชั่วโมงที่คำนวณแล้วได้ค่าความสั่นสะเทือนเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 เมตรต่อวินาที^{2} หากคิดความสั่นสะเทือนที่ผู้ปฏิบัติได้รับในเวลา 4.5 ชั่วโมง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A(4.5)=\sqrt{\frac{1}{4.5h}\left[\left(2m/s^2\right)^2\times 1h+\left(3.5m/s^2\right)^2\times 3h+\left(10m/s^2\right)^2\times 0.5h\right]}$$

$$=4.5 \quad m/s^2$$

ผู้ปฏิบัติงานได้รับความสั่นสะเทือนเท่ากับ 4.5 เมตรต่อวินาที^{2} จากการทำงานนาน 4.5 ชั่วโมง ดังนั้นจะเทียบกับมาตรฐานที่ทำงานนาน 8 ชั่วโมง ค่าจะได้เท่ากัน โดยใช้สมการที่ (9.5) ในการคำนวณต่อไปดังนี้

$$A(8) = 4.5\sqrt{\frac{4.5}{8}}$$

$$= 3.4 \quad m/s^2$$

ความสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดผลกระทบกับผู้ปฏิบัติงานที่ทำให้เกิดอาการนิ้วซีดขาวจำนวนร้อยละ 10 ที่ได้รับความสั่นสะเทือนวันละ 8 ชั่วโมงทำงาน ในระยะเวลานาน 1 ถึง 10 ปี ดังแสดงในตารางที่ 9.5 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ของระดับความสั่นสะเทือนที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับกับระยะเวลาการปฏิบัติงานดังสมการที่ (9.7)

$$\frac{D_y}{year} = 31.8\left(\frac{A(8)}{m/s^2}\right)^{-1.06} \quad \text{.....(9.7)}$$

เมื่อ

A(8) เป็นค่าระดับความสั่นสะเทือนที่ได้รับนาน 8 ชั่วโมงต่อวัน

D_y เป็นค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่ได้รับความสั่นสะเทือน (ปี)

ตารางที่ 9.5 ความสัมพันธ์ของค่าระดับความสั่นสะเทือนกับระยะเวลาที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับความสั่นสะเทือนแล้วทำให้เกิดนิ้วซีดขาวร้อยละ ของผู้ที่ได้รับความสั่นสะเทือน 10

D_y, ปี	1	2	4	8
A (8), เมตรต่อวินาที^{2}	26	14	7	3.7

เมื่อทำการวัดความสั่นสะเทือนแล้วให้นำผลที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับตารางที่ 9.5 ที่ใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาโอกาสที่อาจจะทำให้เกิดนิ้วซีดขาวได้หากมีค่าสูงกว่าที่กำหนดไว้ในตาราง ทั้งนี้ต้องพิจารณาระยะเวลาที่ได้รับความสั่นสะเทือนด้วย เช่น หากวัดความสั่นสะเทือนแล้วได้ค่าเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที^{2} ในการคำนวณระยะเวลา ที่ต้องการทราบว่าถ้าทำงานที่มีความสั่นสะเทือนระดับนี้นานเท่าไรจึงอาจจะทำให้เกิดอาการนิ้วซีดขาว ที่สามารถคำนวณจากสมการ (9.7)

$$\frac{D_y}{year} = 31.8\left(\frac{10}{m/s^2}\right)^{-1.06}$$

$$\frac{D_y}{year} = 2.76$$

คำตอบที่ได้จากการคำนวณคือ ที่ระดับความสั่นสะเทือนเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที^{2} ถ้าทำงานนาน 2.76 ปี มีโอกาสที่จะทำให้นิ้วซีดขาวจำนวนร้อยละ 10 ของผู้ที่ปฏิบัติงานที่ได้รับความสั่นสะเทือนเท่ากับ 10 เมตรต่อวินาที^{2}

การวัดความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย

การวัดความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย เป็นการวัดเพื่อประเมินความสั่นสะเทือนที่อาจมีผลต่อสุขภาพ ต่อความรู้สึกสบาย ต่อการรับรู้ และการคลื่นไส้ เวียนศีรษะ ที่เกิดจากความถี่อยู่สองช่วง คือ ช่วงความถี่ที่มีผลต่อสุขภาพ คือ 0.5-1.15 เมตรต่อวินาที^{2} และช่วงความที่ทำให้รู้สึกทำความไม่สบาย 9.1-21.0 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ โดยการวัดความสั่นสะเทือนของแกน x y และ z แต่ละแนวแกนแล้วปรับค่าเป็นค่าความสั่นสะเทือนที่ปรับด้วยค่าถ่วงน้ำหนักตามความถี่ที่มีผลต่อผู้ปฏิบัติแต่ละประเภทของงาน ด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของการประเมินผลที่มีต่อสุขภาพ ต่อความรู้สึกสบาย ต่อการรับรู้ และการคลื่นไส้เวียนศีรษะมีค่าแตกต่างกัน Directive 2002/44/EC of the European Parliament and the Council กำหนดค่าที่ต้องดำเนินการป้องกันเบื้องต้น (Action Level) และค่าขีดจำกัดสูงสุด (Limit Level) และค่าสัมผัสการสั่นสะเทือนสะสม (Vibration Dose) ISO 2631:1997 Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Huma Exposure to Whole Body Vibration กำหนดมาตรฐานระดับความสบาย

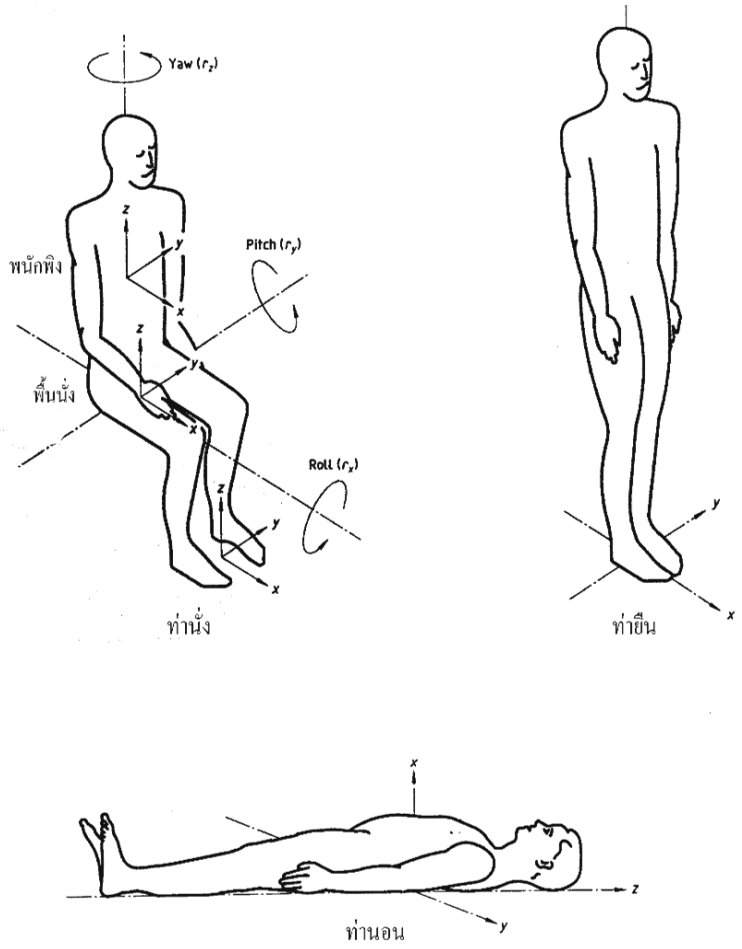
1. การเตรียมความพร้อมสำหรับการประเมิน

ในการวัดความสั่นสะเทือนต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดเพื่อที่จะได้ค่าที่เชื่อถือได้ต้องประกอบด้วย

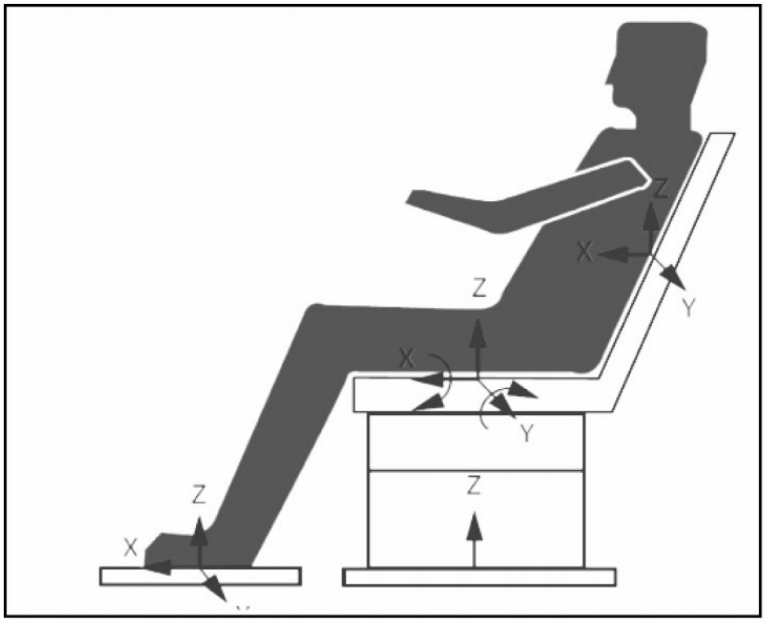
1.1 ทิศทางการวัด จะต้องวัดในทิศทางเดียวกันกับความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ว่าเกิดตามแนวแกนใด การติดตั้งหัววัดต้องเป็นไปตามทิศทางแนวแกน x, y และ z ที่มีความสั่นสะเทือนที่ยอมให้เบี่ยงเบนได้ 15 องศา เช่น การวัดความสั่นสะเทือนของผู้ปฏิบัติงานนั่งบนเก้าอี้ ที่ผู้นั่งอาจจะนั่งไม่ตั้งฉากกับแนวระนาบ ดังนั้นแนวแกน z ที่เป็นแนวแกนของลำตัว อาจจะเอียงทำมุมกับแนวดิ่งก็ได้ ดังนั้นการติดตั้งหัววัดเพื่อวัดความสั่นสะเทือนตามแนวแกนอื่นที่เหลือ (x, y) ควรติดหัววัดตามลักษณะมุมที่ตั้งฉากกันทั้งสามแกน และจุดที่วัดในบริเวณนี้ทั้งสามแกนจะต้องอยู่ใกล้เคียงกัน (ภาพที่ 9.11)

1.2 การติดตั้งหัววัด ควรติดตั้งอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดความสั่นสะเทือนกับร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน เช่น ถ้าผู้ปฏิงานนั่งบนเก้าอี้ ควรติดตั้งหัววัดที่บนที่นั่งของเก้าอี้ ที่พนักพิง และที่เท้า การวัดบนเก้าอี้ให้วางหัววัดอยู่ใต้กระดูกที่ตำแหน่งใต้อุ้งเชิงกราน (Ischial tuberosity) การวัดที่พนักพิงให้วัดที่บริเวณตำแหน่งของหลังกับที่พนักพิง และที่เท้าให้วัดที่ตำแหน่งที่มีการวางเท้าบ่อยที่สุด เพราะโดยปกติแล้วผู้ปฏิบัติงานอาจมีการขยับเท้าไปมาตามความสะดวก หรือหากผู้ปฏิบัติงานอยู่ในท่าเอกเขนก ให้วัดที่ตำแหน่งใต้เชิงกราน ที่หลัง และที่ศีรษะที่สัมผัสกับสิ่งที่สั่นสะเทือน อย่างไรก็ดี ตำแหน่งที่วัดนี้ต้องระบุไว้ในรายงานด้วยว่าวัดที่ส่วนใดของร่างกาย (ภาพที่ 9.12)

1.3 ระยะเวลาในการวัด ต้องมีระยะเวลานานพอที่การวัดจะได้ค่าที่เที่ยงตรงตามหลักสถิติ ที่ต้องมีการระบุระยะเวลาที่วัดในรายงานด้วยว่า วัดเป็นเวลานานเท่าไร เพราะงานแต่ละอย่างอาจมีลักษณะงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งอาจจะต้องมีการวิเคราะห์งานเพิ่มเติม ถ้าต้องการวัดให้ได้ค่าที่แตกต่างกันไม่เกิน 3 เดซิเบล ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 ต้องวัดความสั่นสะเทือนในเวลาที่ไม่น้อยกว่า 108 วินาที สำหรับความถี่ที่ไม่ต่ำกว่า 1 เฮิรตซ์ และวัดไม่น้อยกว่า 227 วินาที สำหรับความถี่ที่ไม่ต่ำกว่า 0.5 เฮิรตซ์



ภาพที่ 9.11 ความสั่นสะเทือนทั้งร่างกายนี้ แบ่งตามแนวแกนได้สามทางคือ x, y และ z
ที่มา: ISO 2631-1:1997



WBV measurement direction and location

ภาพที่ 9.12 การติดตั้งวัดความสั่นสะเทือนทั้งร่างกายที่เบาะนั่งรถ
ที่มา: Alphin.M.S, K.Sankaranarayanasamy and S.P.Sivapirakasam, (2010)

ในกรณีที่พื้นผิวที่สัมผัสกับร่างกายเป็นวัสดุที่นุ่ม เช่นเบาะนั่ง ให้ติดหัววัดไว้ระหว่างผู้ปฏิบัติกับเบาะที่นั่ง โดยต้องพิจารณาการติดหัววัดที่จะไม่ทำให้เกิดแรงกดบนเบาะจนมีผลต่อค่าความสั่นสะเทือนเปลี่ยนไปจากความเป็นจริง

2. วัดความสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ

การวัดความสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพปริมาณการสะสมของความสั่นสะเทือน ยกกำลัง ¼ (the fourth power Vibration Dose Value; VDV) การประเมินความสั่นสะเทือนต้องพิจารณาจากแนวแกนที่มีค่าความเร่งที่สูงสุดของความถี่ในช่วงที่มีผลต่อสุขภาพ และถ้าความเร่งที่เกิดในแนวแกนมากกว่าสองแนวแกนมีค่าใกล้เคียงกัน ให้ทำการรวมผลของเวกเตอร์

2.1 การวัดความสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเมื่อผู้ปฏิบัติงานทำงานงานเดียว สามารถประเมินได้ตามสมการ (9.8) สำหรับการถ่วงน้ำหนักตามความถี่ที่ใช้กับผู้ปฏิบัติงานในท่านั่งใช้ค่าแฟกเตอร์ตัวคูณดังนี้ คือ

แนวแกนx: สำหรับ Wd ค่า k = 1.4

แนวแกนy: สำหรับ Wd ค่า k = 1.4

แนวแกน z: สำหรับ Wk ค่า k = 1

$$VDV_{exp,x} = k \times VDV_x \left(\frac{T_{exp}}{T_{meas}}\right)^{1/4} \quad \text{..... (9.8)}$$

2.2 การวัดความสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเมื่อผู้ปฏิบัติงานทำงานหลายงาน ให้คำนวณความเร่งที่เกิดในแนวแกนแต่ละแกนตามสมการ (9.8) แล้วรวมแกนด้วยสมการ (9.9)

$$VDV_{total} = \left(\sum_i VDV_i^4\right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{..... (9.9)}$$

การวิเคราะห์ผลจากการตรวจวัด

การวิเคราะห์ความสั่นสะเทือนทั้งร่างกายสามารถประเมินได้ จากการทำงานเดียวต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงาน และการปฏิบัติงานหลายอย่าง แล้วนำผลรวมของงานแต่ละอย่างมารวมกันประเมินผลการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน รายละเอียดดังนี้

1. การหาค่า VDV เมื่อทำงานชนิดเดียว

คนขับเครนทำงานนาน 4.5 ชั่วโมง การผลการวัดค่า VDV บนที่นั่งของคนงานเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบค่า VDV ของแต่ละแนวแกนดังนี้ แกน x, y และ z เท่ากับ 5, 4, 6 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ ตามลำดับ จงประเมินว่าคนงานขับเครนได้รับความสั่นสะเทือนเกินมาตรฐานที่กำหนดหรือไม่

วิธีทำ ปรับผลจากการวัดความสั่นสะเทือนเวลา 3 ชั่วโมง (Tmeasure) ให้คำนวณความสั่นสะเทือนที่คนงานได้รับจริงๆ เป็นเวลา 4.5 ชั่วโมง (Texposure) โดยใช้สมการ

$$VDV_{exp,x} = k \times VDV_x \left(\frac{T_{exp}}{T_{meas}}\right)^{1/4}$$

คำนวณหาค่า VDV ของแต่ละแนวแกน จากสมการที่ต้องมีค่าแฟกเตอร์ k เข้ามาเกี่ยวข้องในสมการด้วย คือ แนวแกน x: k = 1.4 แนวแกน y: k = 1.4 แนวแกน z: k = 1

แกน x, $VDV_{exp,x} = 1.4 \times 5 \left(\frac{4.5}{3}\right)^{1/4}$ = 7.75 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

แกน y, $VDV_{exp,y} = 1.4 \times 4 \left(\frac{4.5}{3}\right)^{1/4}$ = 6.2 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

แกน z, $VDV_{exp,z} = 6 \left(\frac{4.5}{3}\right)^{1/4}$ = 6.64 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

สรุป ค่าความสั่นสะเทือนที่มีค่าสูงสุดคือจากแกน x มีค่าเท่ากับ 7.75 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้เป็นค่าระดับที่ต้องมีการดำเนินการป้องกัน (action level) เท่ากับ 9.1 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ (หรือเท่ากับ 0.5 เมตรต่อวินาที^{2})

2. การหาค่า VDV เมื่อทำงานหลายงาน

ถ้าคนงานได้รับความสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดหลายๆ แหล่ง ดังนั้นต้องรวมค่า VDV ของแกนเดียวกันจากงานหลายๆ งานเข้าด้วยกัน เช่นคนงานขับรถฟอร์คลิฟท์ยกของในโกดังนาน 1 ชั่วโมง ค่าความสั่นแกน x, y, z เท่ากับ 6, 4, 12 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ ตามลำดับ ต่อจากนั้นไปขับรถบรรทุกไปส่งของใช้เวลา ชั่วโมง 6ค่าความสั่นแกน x, y, z เท่ากับ 4, 5, 6 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ ตามลำดับ ต้องการทราบว่าคนงานได้รับความสั่นสะเทือนเกินมาตรฐานหรือไม่

วิธีทำ คำนวณความสั่นสะเทือนที่ได้รับตามแนวแกนของงานขับรถฟอร์คลิฟท์ยกของในโกดังและขับรถบรรทุกไปส่งของด้วยสมการดังนี้

$$VDV_{exp,x}=k\times VDV_x\left(\frac{T_{exp}}{T_{meas}}\frac{1}{1}\right)^{\frac{1}{4}}$$

รถฟอร์คลิฟท์ แกน x,

$$VDV_{exp,x}=1.4\times 6\left(\frac{1}{1}\right)^{1/4}=8 \text{ เมตรต่อวินาที}^{1.75}$$

รถฟอร์คลิฟท์ แกน y,

$$VDV_{exp,y}=1.4\times 4\left(\frac{1}{1}\right)^{1/4}=6 \text{ เมตรต่อวินาที}^{1.75}$$

รถฟอร์คลิฟท์ แกน z,

$$VDV_{exp,z}=12\left(\frac{1}{1}\right)^{1/4}=12 \text{ เมตรต่อวินาที}^{1.75}$$

รถบรรทุก แกน x,

$$VDV_{exp,x}=1.4\times 4\left(\frac{6}{4}\right)^{1/4}=6 \text{ เมตรต่อวินาที}^{1.75}$$

รถบรรทุก แกน y,

$VDV_{exp,y}=1.4\times5\left(\frac{6}{4}\right)^{1/4}=8$ เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

รถบรรทุก แกน z,

$VDV_{exp,z}=6\left(\frac{6}{4}\right)^{1/4}=7$ เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

เมื่อได้ค่าความสั่นสะเทือนสะสมที่คนขับได้รับจากทั้งสองงาน ให้นำความสั่นสะเทือนสะสมที่ได้ในแต่ละแกนของทั้งสองงานมารวมกัน โดยใช้หลักการที่ใช้รวมความสั่นสะเทือนที่มาจากหลายแกน ให้ระวังเรื่องของหน่วยที่ใช้สำหรับความสั่นสะเทือนสะสมมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที$^{1.75}$ ได้ดังนี้

รวมค่าแกน x, $VDV_x=\left(8^4+6^4\right)^{1/4}=9$ เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

รวมค่าแกน y, $VDV_y=\left(6^4+8^4\right)^{1/4}=9$ เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

รวมค่าแกน z, $VDV_z=\left(12^4+7^4\right)^{1/4}=12$ เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

สรุป ค่าความสั่นสะเทือนที่สูงสุดคือแกน z มีค่าเท่ากับ 12 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ ซึ่งอยู่ระหว่างมาตรฐานที่กำหนดไว้เป็นค่าที่ต้องมีการดำเนินการป้องกัน (action level) เท่ากับ 9.1 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ และค่ามาตรฐานที่กำหนด (exposure limit) ไว้เท่ากับ 21 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$

สรุป

การประเมินความสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน ประเมินได้ ลักษณะ คือ 2 ลักษณะที่เกิดขึ้นที่มือและแขน และลักษณะที่เกิดทั่วร่างกาย โดยใช้เครื่องมือวัดความสั่นสะเทือนที่ประกอบด้วยตัวเครื่องวัด (Vibration Meter) และหัววัด (Transducer) ที่ระบุไว้ตามวิธีมาตรฐานของ ISO 8662 สำหรับเครื่องวัดความสั่นสะเทือนมือและแขนหัววัดออกแบบมาให้ติดตั้งติดกับอุปกรณ์จับยึดที่เหมาะสมกับเครื่องมือต่างๆ เช่น สว่าน เครื่องเลื่อย เครื่องเจียร เป็นต้น ค่ามาตรฐานที่มือและแขนสำหรับการทำงาน 4 ชม. และน้อยกว่า 8 ชม. ความสั่นสะเทือนไม่เกิน 4 เมตรต่อวินาที^{2} ส่วนหัววัดความสั่นสะเทือนทั้งลำตัวออกแบบมาลักษณะแผ่นแบนให้สามารถนั่งทับ พิง หรือเหยียบได้ เป็นการวัดเพื่อประเมินความสั่นสะเทือนที่อาจมีผลต่อสุขภาพ ต่อความรู้สึกสบาย ต่อการรับรู้ และการคลื่นไส้ เวียนศีรษะ ที่เกิดจากความถี่อยู่สองช่วง คือ ช่วงความถี่ที่มีผลต่อสุขภาพ คือ 0.5-1.15 เมตรต่อวินาที^{2} และช่วงความที่ทำให้รู้สึกทำความไม่สบาย 9.1-21.0 เมตรต่อวินาที$^{1.75}$ เครื่องมือวัดต้องผ่านการสอบเทียบ

โดยการสอบเทียบเครื่องมือวัดกับค่ามาตรฐานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่สามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติ หรือมาตรฐานระหว่างชาติได้ โดยในการสอบเทียบเครื่องมือวัด จะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) ด้วยทุกครั้ง ในปัจจุบันทุกมาตรฐานสากลจะมีข้อกำหนดที่กล่าวถึงการสอบเทียบเครื่องมือวัดทั้งสิ้น เช่น ISO 9000, ISO 14000, ISO/TS 16949, มอก.18000

คำถามทบทวน

1. การประเมินความสั่นสะเทือนที่มีผลต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานมีความสำคัญอย่างไร
2. จงบอกชื่อองค์กรที่กำหนดค่ามาตรฐานความสั่นสะเทือนที่มือ-แขน และทั้งร่างกาย
3. อันตรายจากความสั่นสะเทือนทั้งร่างกาย (Whole Body Vibration) มีอะไรบ้าง
4. อันตรายจากความสั่นสะเทือนมือ-แขน (Hand-Arm Vibration) มีอะไรบ้าง
5. อธิบายการเตรียมความพร้อมสำหรับการประเมินความสั่นสะเทือนมือ-แขน
6. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ประเมินความสั่นสะเทือนประกอบด้วยอะไรบ้าง
7. จงอธิบายตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนมือ-แขน
8. จงอธิบายตำแหน่งที่ติดตั้งหัววัดความสั่นสะเทือนทั้งร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน
9. การประเมินความสั่นสะเทือนความถี่มาเกี่ยวข้องกับการประเมินอย่างไร
10. อธิบายการประเมินความสั่นสะเทือนจากแหล่งกำเนิดหลายๆ แหล่งกำเนิด

เอกสารอ้างอิง

กิตติ อินทรานนต์ .(2553). **การยศาสตร์.** พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์วิทยาลัย

ประมุข โอศิริ. (2553). **สุขศาสตร์อุตสาหกรรม, การประเมิน.** ภาควิชาอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล.

ประมุข โอศิริ. (2554). **ทฤษฎีเสียงและการวัด.** ภาควิชาอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์. มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปริยาภรณ์ โทนหงส์สา ไอลดา ตรีรัตน์ตระกูล และเลิศชัย ระตะนะอาพร. (2555). **การประเมินการสั่นสะเทือนทั้งร่างกายของพนักงานขับรถยกใน บริเวณคลังสินค้า.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปวีณา มีประดิษฐ์. (2547). **เอกสารประกอบการเรียนวิชาการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างทางสุขศาสตร์-อุตสาหกรรม1.** ภาควิชาสุขศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มนตรี พิรุณเกษตร. (2542). **วิศวกรรมการสั่นสะเทือนฉบับประสบการณ์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

มยุรี หน่อพัฒน์. (2547). **การออกแบบเบาะรองนั่งรถบรรทุกเพื่อลดความสั่นสะเทือนและความรู้สึกเมื่อยล้าของพนักงานขับรถบรรทุกหนัก.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหิดล

ศศิภา เลิศจินตนาการ. (2560). **สุขศาสตร์อุตสาหกรรม 1.** สืบค้น 15 สิงหาคม 2560 จาก http://www.npcse.co.th/npc_date/npc_previews.asp?id_head=11&id_sub=36&id=732

ศิริพร วันฟั่น. (2556). **แผนงานสุขศาสตร์อุตสาหกรรม (Industrial Hygiene Program).** สืบค้น 15 สิงหาคม 2560 จาก http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=19198&section=9

หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ. (2552). **การตรวจสอบความสั่นสะเทือนเครื่องจักร.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ซี เอ็ดยูเคชั่น จำ กัด (มหาชน).

ห้องปฏิบัติการ 4257. (2560). **ภาพถ่ายเครื่องมือ.** สาขาวิชาเทคโนโลยีความปลอดภัยและอาชีวอนามัย. มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา.

Alphin.M.S, K.Sankaranarayanasamy and S.P.Sivapirakasam. (2010). **Experimental Evaluation of Whole Body Vibration exposure from Tracked Excavators with Hydraulic Breaker Attachment in Rock Breaking operations.** Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Tiruchirapalli -620 015, Tamilnadu, India.

Arezes.M.P. and N.Costa. (2009). **The Influence of Operator Driving Characteristics in**

Whole Body Vibration Exposure from Electrical Fork-Lift Truck. International Journal of Industrial Ergonomics. 39: 34-38

Buel and Kjae. (1989). **Human Vibration.** Retrieved, June, 1, 2017 from http://www.bksv.com/doc/ br056.pdf, 27 July 2012.

International Organization for Standardization (ISO). (1997). **Mechanical Vibration and ShockEvaluation of Human Exposureto Whole-Body Vibration-Part 1 : General Requirements.**