บทที่ 3
การวัดมวลและความหนาแน่น

มวลเป็นปริมาณรากฐาน (base quantity) อันหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญในตัวเองและเป็นมาตรฐานอ้างอิงของปริมาณอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น (density) แรง (force) ความกดดัน (pressure) แรงบิด (torque) การวัดปริมาณเหล่านี้ให้ได้ความละเอียดถูกต้องสูง ต้องอาศัยการวัดมวลให้ได้ความละเอียดถูกต้องสูงเป็นสำคัญ ความถูกต้องของการวัดมวลนอกจากจะเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนางานวิเคราะห์วิจัยทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและอุตสาหกรรมแล้ว ยังเกี่ยวข้องกับการค้าขายตามท้องตลาดหรือแม้แต่ในชีวิตประจำวันทั่วไป

การวัดมวลทำโดยเปรียบเทียบมวลที่ต้องการวัดกับมวลอ้างอิง (reference mass) ซึ่งทราบค่าแล้ว โดยวิธีการชั่ง (weighing) ด้วยเครื่องชั่ง (Balance) มวลอ้างอิงที่ทราบค่าแล้วนี้ใช้เป็นมาตรฐานในการหาค่ามวล เรียกว่ามวลมาตรฐาน

สำหรับการวัดความหนาแน่น มีวิธีการวัดหลายวิธีขึ้นอยู่กับสถานะของสิ่งที่จะวัด ถ้าเป็นของเหลวใช้ Hydrometer หรือ Pycnometer ถ้าเป็นของแข็งใช้วิธีการแทนที่น้ำโดยใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes' Principle)

3.1 นิยามหน่วยรากฐานของมวล

มวลเป็นปริมาณรากฐานอันหนึ่งในทั้งหมด 7 ปริมาณ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kilogram) โดยนิยามว่า "The standard for the unit of mass, the kilogram is a cylinder of platinum-iridium alloy kept by the International Bureau of Weights and Measures at Paris." หมายความว่า มาตรฐานที่กำหนด 1 กิโลกรัมคือ มวลมาตรฐานสากลต้นแบบ1 กิโลกรัม (International Prototype Kilogram) ทำด้วยโลหะผสมของแพลทตินัม- อิริเดียมเป็นรูป

ทรงกระบอก เก็บรักษาไว้ในสถาบัน BIPM ใกล้กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกว่ามีมวลขนาด 1 กิโลกรัมอย่างแท้จริง

มวลมาตรฐานอื่นทั้งหมดทั่วโลกต้องนำมาสอบเทียบกับมวลมาตรฐานสากลนี้ไม่โดยตรงก็โดยทางอ้อม โดยข่ายงานสอบเทียบมวลภายในประเทศและข่ายงานสอบเทียบมวลระหว่างประเทศ

อาจกล่าวได้ว่ามนุษย์เริ่มรู้จักการหาค่ามวลตั้งแต่ก่อนคริสต์ศักราช 500 ปี เครื่องมือที่ใช้หาค่ามวลตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบัน ได้แก่ ตุ้มน้ำหนัก และเครื่องชั่ง

ความหมายของมวลตามวิชากลศาสตร์เริ่มใช้กันในราวต้นศตวรรษที่ 18 โดยกำหนดให้มวลของวัตถุใด หมายถึง ปริมาณของเนื้อสารที่รวมกันอยู่ในวัตถุนั้น มวลของวัตถุมีค่าคงที่ไม่ว่าวัตถุนั้นจะอยู่ที่ใด หรือ มวล หมายถึง คุณสมบัติของสารในวัตถุใดๆ ซึ่งแสดงออกมาในรูปของความเฉื่อยอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้นและการดึงดูดระหว่างวัตถุนั้นกับวัตถุอื่น

ความหมายของมวลและน้ำหนัก (Mass and Weight)

ปัจจุบันคำว่า Weight แปลออกมาได้หลากหลายความหมาย เช่น Weight (น้ำหนัก) ของวัตถุใด หมายถึง แรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่อมวลของวัตถุนั้น หรือ Weight (ตุ้มน้ำหนัก) อาจใช้ในความหมายของมวล (Mass) ซึ่งหมายถึงขนาดของมวลหรือมวลมาตรฐาน (Mass Standards) ก็ได้ ดังนั้น การใช้คำว่า Weight จึงควรหลีกเลี่ยงเพราะเป็นคำที่มีหลายความหมายและอาจทำให้เกิดความสับสนได้ นักชั่งตวงวัดหลายท่านได้ให้นิยามของคำว่า Weight ไว้ว่า Weight is a term that has several meanings and should therefore be avoided.

ความสับสนเกี่ยวกับความหมายของคำว่า Weight ได้เกิดขึ้นมานานแล้ว คณะกรรมการชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (International Committee on Weights and Measures, CIPM) โดยคณะกรรมการที่ปรึกษาด้านมวล (CCM) ได้มีการประชุมเพื่อหาข้อยุติครั้งแรกในปี ค.ศ. 1891 (พ.ศ. 2434) ที่ประชุมเห็นว่าคณะกรรมการว่าด้วยกฎหมายชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (Intenational Committee on Legal

Metrology, CIML) จะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ แต่ผลปรากฏว่า CIML ไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ประกอบกับมีข้อโต้เถียงเกี่ยวกับความหมายของคำว่า Weight กันมากในสหรัฐอเมริกา คณะกรรมการที่ปรึกษาว่าด้วยระบบหน่วย (CCU) จึงต้องนำเรื่องดังกล่าวมาพิจารณาอีกในปี ค.ศ. 1892 (พ.ศ. 2435)

ในปลายศตวรรษที่ 19 คำว่า Kilogram ได้มีการใช้อย่างแพร่หลาย โดยใช้เป็นหน่วยของแรง เช่น แรงมีหน่วยเป็นกิโลกรัม ความกดดัน (pressure) และความเครียด (stress) มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร งานมีหน่วยเป็นกิโลกรัม-เมตร แม้ว่าในการประชุมใหญ่ว่าด้วยมาตราชั่งตวงวัด (CGPM) ครั้งที่ 1 เมื่อปี ค.ศ. 1889 (พ.ศ. 2432) ได้มีมติยอมรับแบบประถมกิโลกรัม (Kilogram Prototype) ที่ CIPM ได้จัดทำขึ้นในปี ค.ศ. 1887 (พ.ศ. 2430) และแบบประถมกิโลกรัมนี้ให้ถือว่าเป็นหน่วยของมวล แต่ยังเกิดข้อถกเถียงกันว่า หน่วยกิโลกรัมที่กำหนดขึ้นนั้น จะถือว่าเป็นหน่วยของมวล หรือหน่วยของแรง เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนที่อาจเกิดขึ้น ที่ประชุมใหญ่ว่าด้วยมาตราชั่งตวงวัดครั้งที่ 3 ปี ค.ศ. 1901 (พ.ศ. 2444) ได้มีมติ ดังนี้

1. **Kilogram** เป็นหน่วยของมวล และให้มีค่าเท่ากับมวลของแบบประถมกิโลกรัมที่เก็บรักษาไว้ที่สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ ตามข้อกำหนดของการประชุมใหญ่ว่าด้วยมาตราชั่วตวงวัดครั้งที่ 1

2. **Weight** หมายถึง ปริมาณที่มีคุณสมบัติเหมือนแรง โดยกำหนดให้น้ำหนักของวัตถุ หมายถึง ผลคูณของมวลของวัตถุกับความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง น้ำหนักมาตรฐานของวัตถุใด คือ ผลคูณของมวลของวัตถุนั้นกับความเร่งมาตรฐานอันเนื่องมาจากความโน้มถ่วง

3. ค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงมาตรฐาน มีค่าเท่ากับ 980.665 เซนติเมตร/วินาที^{2}

จึงคาดกันว่ามติของที่ประชุมใหญ่ว่าด้วยมาตราชั่งตวงวัดครั้งที่ 3 ค.ศ.1901 จะทำให้การใช้คำว่า Weight และ Mass ไม่เกิดความสับสนอีกต่อไป อย่างไรก็ตาม การใช้กิโลกรัมในหน่วยของแรงก็ยังคงมีอยู่ แม้ว่าจะไม่มีกฎหมายรองรับก็ตาม แต่ก็ได้มีการ

แก้ไขโดยการใช้ newton เป็นหน่วยของแรง ที่ประชุมของ CCU ได้เข้าใจถึงปัญหาและแก้ไขปัญหาในช่วงที่ผ่านมา และได้พิจารณาเห็นว่าในทาง Legal Metrology นั้น คำว่า Weight ใช้ในความหมายของ Mass มานานแล้ว อย่างไรก็ตามในทางวิทยาศาสตร์ การใช้คำว่า Weight แทน Mass อาจมีปัญหาได้ จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้คำว่า Weight คณะกรรมการที่ปรึกษาด้านมวลเห็นว่าไม่สามารถที่จะให้ข้อยุติเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ นอกจากตั้งความหวังไว้ว่า ในอนาคตถ้าทุกคนทราบความแตกต่างระหว่างคำว่า แรง (force) กับมวล (Mass) ดีแล้ว คำว่า Weight ก็จะสามารถใช้เป็นคำที่มีความหมายเหมือน (Synonym) กับ Mass

3.2 มาตรฐานมวล

มาตรฐานด้านมวลที่ยอมรับเป็นมาตรฐานสากล (International Standard) คือ มวลมาตรฐานสากลต้นแบบ 1 กิโลกรัม

มวลมาตรฐานในลำดับรองลงมาซึ่งผลิตด้วยกระบวนการเดียวกันกับมวลมาตรฐานสากลต้นแบบ เรียกว่า แบบพิมพ์ของมวลมาตรฐานสากลต้นแบบ 1 กิโลกรัม (Copy of the prototype kilogram) ถือได้ว่าเป็นมวลมาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงมาก หลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา อังกฤษ ออสเตรเลีย เกาหลี เป็นต้น ได้เก็บรักษามวลมาตรฐานเหล่านี้ไว้เป็นมาตรฐานระดับประเทศ (International Standard) ของตน สำหรับประเทศอื่นๆ ที่ไม่ได้เก็บรักษามาตรฐานเหล่านี้ ก็อาศัยมาตรฐานเหล่านี้อ้างอิงสอบเทียบเป็นมาตรฐานแห่งชาติ (National Standard) ของประเทศ

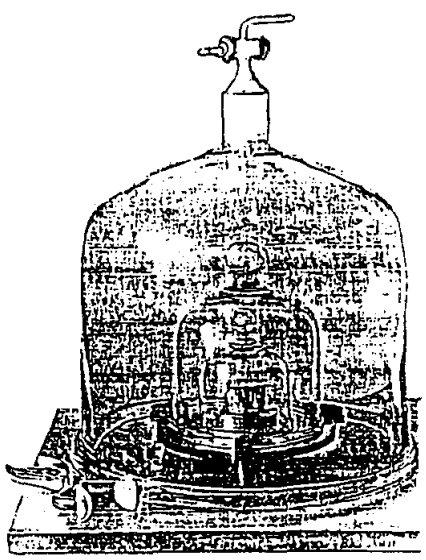
มวลมาตรฐานในลำดับรองๆ ลงมาจะมีความถูกต้องต่างๆ กัน แบ่งเป็นชั้นแต่ละชั้นเหมาะกับงานแต่ละประเภท งานบางประเภทต้องการความถูกต้องสูง เช่น งานมาตรฐานด้านมวล งานสอบเทียบมวลมาตรฐาน งานสอบเทียบเครื่องชั่ง เป็นต้น สำหรับงานวัดมวลในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทต้องการความถูกต้องไม่มากนัก

นอกจากคุณสมบัติด้านความถูกต้องแล้ว มวลมาตรฐานยังต้องกำหนดรูปลักษณ์คุณสมบัติอื่นๆ อีกด้วย กล่าวคือ ทำจากวัสดุที่มีความคงทนสูง (stable) ไม่เป็นสารแม่-

เหล็ก ไม่เป็นสนิม มีรูปทรงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน โลหะที่แนะนำให้ใช้ทำมวลมาตรฐาน ได้แก่ อะลูมิเนียม, เหล็กหล่อ (cast iron), เหล็กไร้สนิม (stainless steel), นิกเกิล (Nickel), โครเมียม (Chromium), ทองเหลือง (brass), ทองคำ (Gold), ทองคำขาว (Platinum) เป็นต้น

มวลมาตรฐานแบ่งตามหน้าที่การใช้งาน ได้ดังนี้ คือ

ก. **มวลมาตรฐานระหว่างประเทศ** (International Standard Mass) ใช้มวลมาตรฐานสากลต้นแบบ 1 กิโลกรัมเป็นมาตรฐาน (International Prototype 1 kilogram) ซึ่งเป็นมวลมาตรฐานอ้างอิงสำหรับการวัดมวลทั่วโลก ถือว่ามีขนาด 1 กิโลกรัมอย่างแท้จริง และยังใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) ในการสอบเทียบมวลมาตรฐานแห่งชาติของประเทศต่างๆ



รูปที่ 3.1 ต้นแบบมวลกิโลกรัมระหว่างประเทศ

ข. **มวลมาตรฐานแห่งชาติ** (National Standard Mass) คือ มวลที่ใช้แบบพิมพ์อันเดียวกันกับมวลมาตรฐานสากล และได้รับการสอบเทียบโดยตรงกับมวลมาตรฐาน

สากลต้นแบบทุกๆ 10 ปี และใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงสอบเทียบมวลมาตรฐานแห่งชาติของประเทศอื่นที่ไม่มีมวลมาตรฐานเหล่านี้ ซึ่งถือว่าเป็นการสอบเทียบโดยอ้อมกับมวลมาตรฐานสากลต้นแบบ หน้าที่สำคัญของมวลมาตรฐานแห่งชาติ คือ ใช้เป็นมาตรฐานสอบเทียบมวลมาตรฐานรอง (secondary standard) ภายในประเทศ มวลมาตรฐานรองนี้มีหลายระดับชั้น ระดับที่สอบเทียบโดยตรงกับมาตรฐานแห่งชาติ มีความไม่แน่นอน (uncertainty) น้อย ถือเป็นระดับสูง ระดับที่สอบเทียบโดยอ้อมคือสอบเทียบผ่านมาตรฐานรองตัวอื่น มีความไม่แน่นอนมาก ถือเป็นระดับต่ำ มวลมาตรฐานรองที่สอบเทียบโดยอ้อมกับมวลมาตรฐานแห่งชาติโดยผ่านมาตรฐานรองตัวอื่นด้วยจำนวนขั้นตอนที่มากกว่า จะมีค่าความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบสูงกว่า

ค. **ชุดมวลมาตรฐานอ้างอิง** (Reference Standard Set) เป็นชุดมวลมาตรฐานชั้นสูง ได้รับการสอบเทียบกับมวลมาตรฐานแห่งชาติและสอบเทียบกันเองภายในชุด ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงสอบเทียบมวลมาตรฐานชั้นต่ำกว่าภายในประเทศ

ง. **ชุดมวลมาตรฐานใช้งาน** (Working Standard Set) เป็นชุดมวลมาตรฐานชั้นต่างๆ ได้รับการสอบเทียบจากชุดมวลมาตรฐานอ้างอิงหรือมวลมาตฐานใช้งานชั้นสูงกว่า ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการสอบเทียบมวลมาตรฐานอื่นชั้นต่ำกว่า สอบเทียบเครื่องชั่ง ใช้เปรียบเทียบอ้างอิงในการวัดมวลทั่วไป

มวลมาตรฐานที่ใช้โดยทั่วไปทำจากโลหะหลายชนิดแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงาน ซึ่งจะใช้และความละเอียดถูกต้องที่ต้องการ สำหรับมวลมาตรฐานที่มีระดับระดับความถูกต้องสูงสมควรที่จะได้รับการสอบเทียบในระดับความละเอียดถูกต้อง (accuracy) สูง จะต้องทำจากโลหะที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก คงทนต่อการสึกกร่อนเป็นสนิม ขัดผิวเป็นมันเรียบ สะอาด และได้รับการเก็บรักษาเป็นอย่างดี

ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน คือ ก้อน หรือชิ้นวัตถุที่ทำขึ้นให้มีน้ำหนักคงที่ขนาดต่างๆ กัน โดยปกติจะมีขนาดที่ระบุเป็นค่าตัวเลขถ้วนๆ เช่น 1 กิโลกรัม 2 กิโลกรัม 5 กิโลกรัม 200 กรัม 100 กรัม 5 มิลลิกรัม 1 มิลลิกรัม เป็นต้น คุณลักษณะที่สำคัญที่สุดของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน คือ การมีมวลคงที่อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนด นอกจากนั้นยัง

มีข้อกำหนดคุณลักษณะอื่นๆ อีกหลายประการ เกี่ยวกับรูปทรง คุณสมบัติของวัสดุ (เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นสารแม่เหล็ก ไม่เป็นสนิม) ความเรียบของผิว ความทนต่อการสึกหรอ ความหนาแน่นของวัสดุ ความแข็ง เพื่อทำให้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน มีค่ามวลคงที่อยู่ได้เป็นเวลานาน

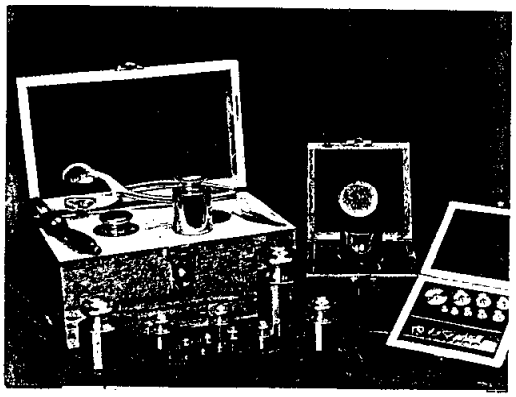
ชนิดของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน อาจจำแนกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

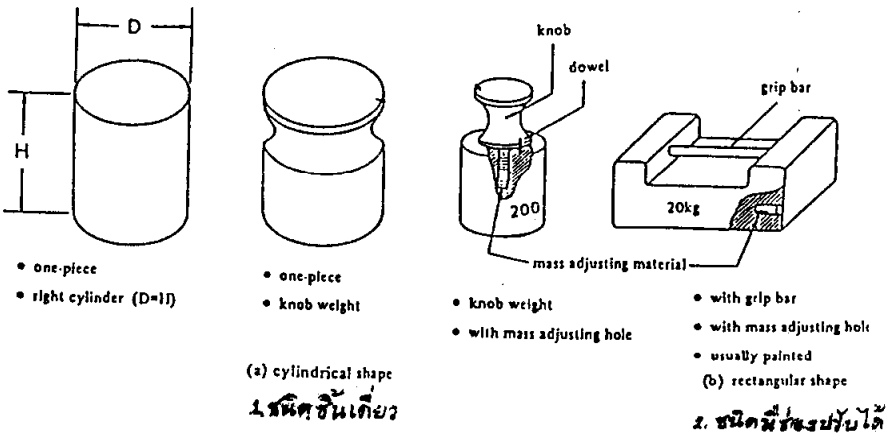
1. ชนิดชิ้นเดียว (One piece) เป็นแท่งโลหะตัน รูปทรงกระบอก ส่วนบนอาจคอดเข้า ให้สามารถใช้ปากคีบจับได้

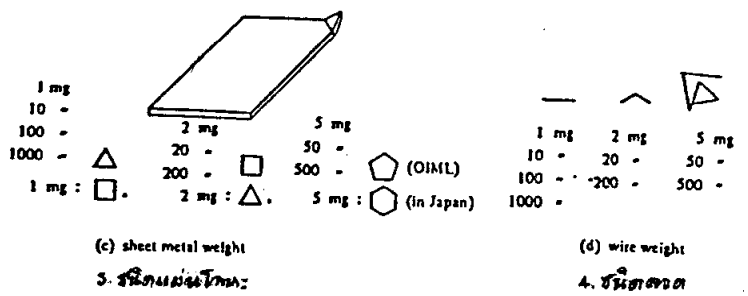
2. ชนิดมีช่องปรับน้ำหนัก เป็นแท่งโลหะทรงกระบอก หรือ แท่งสี่เหลี่ยม มีช่องเจาะไว้สำหรับใส่น้ำหนัก เพื่อปรับให้ตุ้มน้ำหนักนั้นมีค่าถูกต้อง

3. ชนิดแผ่นโลหะ (Sheet metal) เป็นแผ่นโลหะรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ห้าเหลี่ยม หรือหกเหลี่ยม ใช้เป็นน้ำหนักมาตรฐานน้อยๆ

4. ชนิดลวด (Wire) เป็นลวดโลหะดัดงอเป็นรูปเส้นตรงที่ต่อกัน เพื่อให้จำได้ง่ายว่าเส้นใดมีน้ำหนักเท่าใด เช่น ลักษณะ 2 เส้นต่อกัน คือ 200 mg 3 เส้นต่อกัน คือ 300 mg 5 เส้นต่อกัน คือ 500 mg เป็นต้น







รูปที่ 3.2 ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

ระบบมวลของประเทศไทย สำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศ (BIPM) ตั้งอยู่ที่เมือง Sevres ประเทศฝรั่งเศส ได้ก่อตั้งขึ้นตามอนุสัญญาเมตริกเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2418 จนถึงปัจจุบัน มีประเทศภาคีสมาชิก 47 ประเทศ ประเทศไทยได้สมัครเข้าเป็นภาคีสมาชิกอนุสัญญาเมตริกเมื่อปี พ.ศ. 2455 ซึ่งสำนักงานชั่งตวงวัดระหว่างประเทศได้จัดทำต้นแบบมวลกิโลกรัมแห่งชาติให้ โดยสอบเทียบกับตุ้มน้ำหนักแบบมาตรฐานของ BIPM เพื่อใช้เป็นแบบประถมมวลกิโลกรัมของประเทศไทย ตามพระราชบัญญัติมาตราชั่งตวงวัด พ.ศ. 2466

3.3 การวัดมวล

การวัดมวล คือ การเปรียบเทียบมวลที่ต้องการทราบค่ากับมวลที่ทราบค่าแล้ว โดยกระบวนการชั่งด้วยเครื่องชั่ง

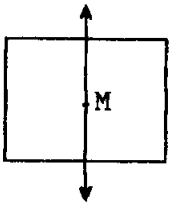
ต้องการเปรียบเทียบแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่อมวลทั้งสองในสนามความโน้มถ่วงของโลกอันเดียวกัน

หลักการ

1. **แรงที่กระทำต่อมวลในอากาศ**

พิจารณาแรงที่กระทำต่อวัตถุ มวล M ซึ่งมีปริมาตร V และมีความหนาแน่น d_m

$F_2 = Mg.(d_a/d_m)$ ∵ ความหนาแน่น = มวล/ปริมาตร



$F_1 = Mg$

$\therefore \quad d_m = M/V$

จะได้ว่า ปริมาตรของวัตถุมวล M คือ

$V = M/d_m$

มวลสารในอากาศจะถูกแรงกระทำ 2 แรง คือ

ก. **แรงดึงลง** (F_1) ในทิศทางดึงลง เนื่องจากสนามความโน้มถ่วงของโลก จะได้ว่า

$F_1 = Mg$ ..... (1)

เมื่อ g = ความเร่งเนื่องจากสนามความโน้มถ่วงของโลก

ข. **แรงลอยตัว** (F_2) ในทิศทางดันขึ้น เนื่องจากการแทนที่อากาศในทิศทางดันขึ้น

มวลสารใดๆ ที่วางอยู่ในอากาศจะต้องถูกกระทำโดยแรงลอยตัว เนื่องจากอากาศในทิศทางดันขึ้น มีขนาดเท่ากับมวลของอากาศที่ถูกแทนที่คูณด้วยความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

สำหรับมวลสาร M จะถูกยกขึ้นด้วยแรงลอยตัว F_2

ขนาดของแรงลอยตัว = (มวลของอากาศที่ถูกแทนที่ด้วยมวลสารนั้น)x(ความเร่งเนื่องจากสนามความโน้มถ่วงของโลก)

$$F_2 = (\text{ปริมาตรของมวลสาร M}) \times (\text{ความหนาแน่นของอากาศ}) \times g$$

$$= (M/d_m) \times d_a \times g$$

$$F_2 = Mg.(d_a/d_m) \qquad \ldots\ldots\ldots (2)$$

เมื่อ d_a = ความหนาแน่นของอากาศ

$\therefore$ แรงลัพธ์ที่กระทำต่อมวล M คือ F

$$F = F_1 - F_2$$

$$\therefore \quad = Mg - Mg.(d_a/d_m)$$

$$F = Mg(1 - d_a/d_m) \qquad \ldots\ldots\ldots (3)$$

นี่คือสมการพื้นฐานสำหรับการชั่งหรือสอบเทียบมวลในอากาศ เราเรียกค่า M ว่าเป็นมวลแท้จริง (true mass) และเรียกค่า $M(1 - d_a/d_m)$ ว่ามวลที่แสดงผล (effective mass)

2. การเปรียบเทียบมวล 2 ก้อน

เมื่อนำมวล M มาชั่งเปรียบเทียบกับมวลมาตรฐาน S เมื่อมวลทั้งสองชั่งได้เท่ากัน เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$M(1 - d_a/d_m) = S(1 - d_a/d_s) \qquad \ldots\ldots\ldots (4)$$

เมื่อ d_s = ความหนาแน่นของมวลมาตรฐาน S

เมื่อมวลทั้งสองชั่งได้ไม่เท่ากัน ต้องรวมมวลขนาด P เข้ากับมวลมาตรฐาน S จึงจะได้ผลการชั่งเท่ากับมวล M เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$M(1 - d_a/d_m) = S(1 - d_a/d_a) + P(1 - d_a/d_p) \quad ..... (5)$$

เมื่อ d_p = ความหนาแน่นของมวล P

ดังนั้นในการสอบเทียบมวลที่ระดับความละเอียดถูกต้องสูง จำเป็นต้องทราบค่าความหนาแน่นของมวลที่สอบเทียบ ความหนาแน่นของอากาศขณะทำการชั่ง true mass ของมวลมาตรฐาน ความหนาแน่นของมวลมาตรฐาน เพื่อนำมาคำนวณค่า true mass ของมวลที่สอบเทียบ

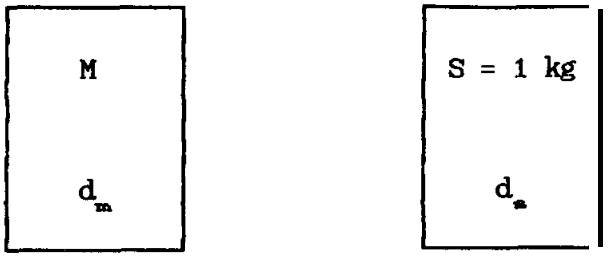
ในทางปฏิบัติ ถ้าเป็นการสอบเทียบมวลที่ระดับความละเอียดถูกต้องไม่สูงนัก อาจหลีกเลี่ยงการคำนึงถึงแรงลอยตัวเนื่องจากอากาศได้

3. true mass, effective mass และ conventional mass

ในการวัดมวล ต้องเปรียบเทียบมวลที่ต้องการวัดกับมวลที่ทราบค่าแล้ว สมมติว่าในการเปรียบเทียบมวล M กับมวลมาตรฐานสากลต้นแบบ 1 กิโลกรัม ปรากฏว่ามวลทั้งสองชั่งได้เท่ากัน จะได้ว่า

ถ้าทำการเปรียบเทียบที่สุญญากาศ แสดงว่า มวล M มีค่า true mass = 1 กิโลกรัม ไม่ว่ามวล M จะมีค่า d_m เท่าใดก็ตาม

ถ้าทำการเปรียบเทียบที่บรรยากาศ แสดงว่า มวลทั้งสองมี effective mass เท่ากันในบรรยากาศขณะนั้น แต่ไม่ได้หมายความว่ามวล M จะต้องมี true mass = 1 กิโลกรัมด้วย



$\therefore$ effective mass = $M(1 - 1.2/d_m) = 1\ kg(1 - 1.2/d_a)$ . . . . . (6)

เมื่อ d_a = ความหนาแน่นของอากาศ = 1.20 kg/m^3 ที่ 20° C

d_s = ความหนาแน่นของมวลมาตรฐานต้นแบบ

จะได้ว่า true mass M จะเป็น 1 กิโลกรัมต่อเมื่อ $d_m = d_s$ เท่านั้น คือ มวลทั้งสองมีความหนาแน่นเท่ากัน แต่ถ้าไม่ทราบความหนาแน่นของมวล M แล้วจะไม่สามารถระบุ true mass ของมวล M ได้

เนื่องจากมวลมาตรฐานทำจากโลหะหลายชนิด มีความหนาแน่นแตกต่างกัน ดังนั้นมวลที่มีขนาด true mass เท่ากัน แต่มีความหนาแน่นต่างกัน จะไม่สามารถชั่งได้สมดุลกันในบรรยากาศ เพื่อให้มวลมาตรฐานที่ระบุค่ามวลเท่ากันชั่งได้สมดุลกันในบรรยากาศ จึงได้กำหนดค่ามวลกลางขึ้นมาค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า conventional mass

Conventional mass (M_c) มวลที่มี true mass เท่ากันจะชั่งได้สมดุลกันในสุญญากาศเสมอ แต่สำหรับการชั่งในบรรยากาศแล้วมวลที่มี true mass เท่ากันจะสมดุลกันเฉพาะมวลที่มีความหนาแน่นเท่ากันเท่านั้น เนื่องจากมวลมาตรฐานทำได้จากโลหะหลายชนิดซึ่งมีความหนาแน่นต่างๆ กัน มวลมาตรฐานที่มี true mass เท่ากันแต่มีความหนาแน่นต่างกันจึงมีปริมาตรไม่เท่ากัน แรงลอยตัวที่กระทำต่อมวลมาตรฐานเหล่านั้นมีขนาดต่างกันไปด้วย ทำให้มวลมาตรฐานที่มีค่า true mass เท่ากัน แต่มีความหนาแน่นต่างกันจึงไม่สมดุลกันในบรรยากาศ ดังนั้นจึงได้นิยามคุณสมบัติด้านมวลขึ้นมาอีกค่าหนึ่ง คือ Conventional mass โดยมีวัตถุประสงค์ว่า มวลที่มีค่า Conventional mass เท่ากันจะต้องสมดุลกันในบรรยากาศปกติ คือ มีความหนาแน่น 1.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไม่ว่ามวลเหล่านั้นจะมีความหนาแน่นเท่าใด กำหนดว่า Conventional mass ของมวลใดมีค่าเท่ากับค่า true mass ของมวลมาตรฐานที่มีความหนาแน่น 8000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งชั่งได้สมดุลกับมวลนั้นในบรรยากาศที่มีความหนาแน่น 1.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นั่นคือ

$$M_c(1 - 1.2/8000) = M(1 - 1.2/d_m) \quad \text{..... (7)}$$

ซึ่ง $M_c(1 - 1.2/8000)$ = effective mass ของ true mass M ที่มีความหนาแน่น d_m

M_c = Conventional mass ของ true mass M ที่มีความหนาแน่น d_m

และใช้ค่า Conventional mass เป็นค่าที่ระบุมวลมาตรฐานต่างๆ ดังนั้นในการสอบเทียบมวลมาตรฐานจึงหมายถึงการสอบเทียบค่า Conventional mass ของมวลมาตรฐานเหล่านั้น เมื่อนำมวลมาตรฐานเหล่านั้นไปสอบเทียบปรับตั้งเครื่องชั่ง ผลที่ได้จากการชั่งก็จะเป็นค่า Conventional mass เช่นกัน การสอบเทียบมวลมาตรฐานและการใช้มวลมาตรฐานสอบเทียบเครื่องชั่งนั้นจะถูกต้องเฉพาะในภาวะความหนาแน่นบรรยากาศ 1.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเท่านั้น เมื่อความหนาแน่นบรรยากาศเปลี่ยนไปจากนี้ ผลของการสอบเทียบก็จะผิดพลาดไปด้วย ความผิดพลาดอันนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความหนาแน่นของมวลมาตรฐานที่นำมาเปรียบเทียบกัน

พิจารณาการเปรียบเทียบมวลมาตรฐานที่ทำจากวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกัน มีค่า Conventional mass เท่ากันในภาวะความหนาแน่นบรรยากาศต่างกัน มวลมาตรฐานทั้ง 3 ทำมาจาก Aluminium, Stainless steel และ Brass

ตารางที่ 3.1

Aluminium	Stainless steel	Brass
d_m = 2700 kg/m^3	d_m = 8000 kg/m^3	d_m = 8400 kg/m^3
M_c = 1 kg	M_c = 1 kg	M_c = 1 kg
M = 1 kg+294.6 mg	M = 1 kg	M = 1 kg - 7.1 mg
V = 0.0003705 m^3	V = 0.0001260 m	V = 0.0001190 m^3

ตารางที่ 3.2

ความหนาแน่นบรรยากาศ, kg/m^3	Effective mass, kg (aluminium)	ผลต่างของ effective mass, mg	Effective mass, kg (stainless steel)	ผลต่างของ effective mass, mg	Effective mass, kg (brass)
1.10	0.9998871	24.6	0.9998625	0.6	3.9998619
1.20	0.9998500	0	0.9998500	0	0.9998500
1.30	0.9998129	24.6	0.9998375	0.6	3.9998381

จากตารางจะเห็นว่าถ้าเปรียบเทียบมวลมาตรฐานที่มีความหนาแน่นบรรยากาศ 1.20 kg/m^3 แล้ว มวลมาตรฐานที่มี M_c เท่ากันจะสมดุลกัน แต่ถ้าความหนาแน่นบรรยากาศเปลี่ยนไป (โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 1.10-1.30 kg/m^3) มวลมาตรฐานคู่ที่มีความหนาแน่นต่างกันมากจะเสียสมดุลมาก มวลมาตรฐานคู่ที่มีความหนาแน่นต่างกันน้อยก็เสียสมดุลน้อย ดังนั้นการเปรียบเทียบมวลมาตรฐานภายใต้ภาวะบรรยากาศที่แปรเปลี่ยนโดยปกตินี้จะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ ดังจะแสดงให้เห็นได้ตามตารางที่ 3.3 (โดยเปรียบเทียบกับมวลมาตรฐานที่มีความหนาแน่น 8000 kg/m^3)

ตารางที่ 3.3 ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด

วัสดุ	ความหนาแน่น, kg/m=	ความคลาดเคลื่อนมากที่สุด, ppm
Aluminium	2700	25
Cast iron	7200	1.4
Stainless steel	7900	0.2
Stainless steel	8000	0
Brass	8400	-0.6
Gold	19280	-7
Platinum	21450	-8

ความคลาดเคลื่อนที่มากที่สุดจะสามารถทำให้น้อยลงได้ ถ้าการสอบเทียบทำในห้องที่ได้รับการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นได้ดี

3.4 การวัดความหนาแน่น

ความหนาแน่นของวัตถุ คือ มวลสารของวัตถุที่มีอยู่ใน 1 หน่วยปริมาตร ณ อุณหภูมิหนึ่ง หน่วยของความหนาแน่นคือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{ความหนาแน่นของของแข็ง(หรือของเหลว)} = \frac{\text{มวลของของแข็ง(หรือของเหลว)}}{\text{ปริมาตรของของแข็ง(หรือของเหลว)}}$$

$$d = m/V \qquad \ldots\ldots (8)$$

เมื่อ d = ความหนาแน่นของวัตถุ

m = มวลสารของวัตถุ

V = ปริมาตรของวัตถุ

มวลสารของวัตถุ m หาได้โดยการชั่งวัตถุด้วยเครื่องชั่ง ถ้าวัตถุเป็นรูปทรงกระบอกตัน หรือทรงสี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม อาจหาได้โดยการวัดสัดส่วน

การหาปริมาตรของวัตถุ V อาจหาได้อีกวิธีหนึ่งโดยอาศัยหลักอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) ซึ่งกล่าวว่า วัตถุที่จมในของเหลว จะจมทั้งหมดหรือจมแต่เพียงบางส่วนในของเหลวก็ตาม น้ำหนักของวัตถุจะลดลงเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุนั้นแทนที่

สมมติต้องการหาปริมาตรของวัตถุจมน้ำ

ให้ m_1 = มวลของวัตถุเมื่อชั่งในอากาศ

m_2 = มวลของวัตถุเมื่อชั่งในน้ำ(กลั่น)

ดังนั้น มวลน้ำที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุที่จม = $m_1 - m_2$

$\therefore$ ปริมาตรของวัตถุ $V = (m_1 - m_2)/\rho$ ..... (9)

เมื่อ ρ = ความหนาแน่นของน้ำ(กลั่น) ณ อุณหภูมิขณะนั้น

สำหรับวัตถุที่เป็นของแข็งจะหาความหนาแน่นโดยใช้หลักอาร์คีมิดิสหรือใช้ขวดความถ่วงจำเพาะ (pycnometer) ส่วนวัตถุที่เป็นของเหลวก็ใช้ขวดความถ่วงจำเพาะหรือ ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

3.4.1 การหาความหนาแน่นของวัตถุที่เป็นของแข็งโดยหลักอาร์คิมิดีส

ก. น้ำหนักของวัตถุที่ชั่งได้ในของเหลว จะมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักของวัตถุที่ชั่งได้ในอากาศ

ข. น้ำหนักของวัตถุที่หายไปในของเหลว (น้ำหนักวัตถุในอากาศลบด้วยน้ำหนักของวัตถุในของเหลว) จะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่

ค. ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่ จะเท่ากับปริมาตรของวัตถุที่จมลงไป

ในของเหลว

$$d = m_1 / [(m_1 - m_2)/\rho]$$

$$\therefore \quad d = m_1\rho / (m_1 - m_2) \qquad \ldots\ldots(10)$$

3.4.2 การหาความหนาแน่นของวัตถุที่เป็นของแข็งโดยใช้ขวดความถ่วงจำเพาะ

ให้ m_o = มวลของขวดความถ่วงจำเพาะ

m_1 = มวลของ (ขวด ถ.พ. + วัตถุที่ใส่)

$\therefore$ มวลของวัตถุ = $m_1 - m_o$

m_2 = มวลของ (ขวด ถ.พ. + วัตถุ + น้ำ(กลั่น)ที่เติมจนเต็มขวด)

$\therefore$ มวลของน้ำที่เติม = $m_2 - m_1$

m_3 = มวลของ(ขวด ถ.พ. + น้ำ(กลั่น)เต็มขวด)

$\therefore$ มวลของน้ำเต็มขวด = $m_3 - m_o$

มวลของน้ำที่มี V เท่ากับวัตถุ = $(m_3 - m_o) - (m_2 - m_1)$

$$\therefore \quad d = \rho \Big/ \frac{(m_1 - m_o)}{(m_3 - m_o) - (m_2 - m_1)} \qquad \ldots\ldots(11)$$

3.4.3 การหาความหนาแน่นของวัตถุที่เป็นของเหลวโดยใช้ขวดความถ่วงจำเพาะ

ให้ m_o = มวลของขวด ถ.พ.

m_1 = มวลของ(ขวด ถ.พ. + ของเหลวเต็มขวด)

$\therefore$ มวลของของเหลว = $m_1 - m_o$

m_2 = มวลของ(ขวด ถ.พ. + น้ำ(กลั่น)เต็มขวด)

$\therefore$ มวลของน้ำ = $m_2 - m_o$

$$\therefore \text{ความหนาแน่นของของเหลว} = \frac{\text{มวลของของเหลวเต็มขวด}}{\text{ปริมาตรของของเหลวเต็มขวด}}$$

แต่ปริมาตรของของเหลวเต็มขวดเท่ากับปริมาตรของน้ำ(กลั่น)เต็มขวด

และ
$$\text{ปริมาตรของน้ำ(กลั่น)เต็มขวด} = \frac{\text{มวลของน้ำ(กลั่น)เต็มขวด}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ(กลั่น)ที่อุณหภูมินั้น}}$$

นั่นคือ ความหนาแน่นของของเหลว

$$= \frac{\text{มวลของของเหลวเต็มขวด}}{\text{มวลของน้ำ(กลั่น)เต็มขวด}} \times \text{ความหนาแน่นของน้ำ(กลั่น)ที่อุณหภูมินั้น}$$

$$d = \rho \cdot (m_1 - m_0)/(m_2 - m_0) \qquad \ldots\ldots (12)$$

การวัดหรือหาความหนาแน่นทั้งของแข็งและของเหลวนั้นอยู่ในปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 (PH 113) ในการทดลองที่ 3 : ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

3.5 การสอบเทียบมวลและความหนาแน่น

การสอบเทียบมวลมาตรฐานมีหลายระดับ แบ่งตามความละเอียดถูกต้องของผลการสอบเทียบที่ต้องการ การที่จะสอบเทียบในระดับใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของมวลมาตรฐานและการนำไปใช้งาน โดยปกติมักทำการสอบเทียบที่ระดับความละเอียดถูกต้อง 1 ใน 10^6 ส่วน การสอบเทียบในระดับนี้จะคุ้มค่าเฉพาะมวลมาตรฐานที่อยู่ในสภาพดี มีคุณสมบัติตรง

ตามมาตรฐาน เป็นต้นว่า ทำจากโลหะที่ไม่เป็นสารแม่เหล็ก คงทนต่อการสึกกร่อนเป็นสนิม ผิวมันขัดเรียบ สะอาด และต้องได้รับการเก็บรักษาอย่างดี มวลมาตรฐานที่ไม่มีคุณลักษณะตรงตามมาตรฐานไม่ควรได้รับการสอบเทียบในระดับนี้

ความเสียหายซึ่งเกิดจากการวัดปริมาณไม่ถูกต้องก่อให้เกิดปัญหามาก ไม่เฉพาะในเรื่องทางวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี หรือในห้องปฏิบัติการทางวิเคราะห์วิจัยเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องในชีวิตประจำวันด้วย เช่น การซื้อขายที่ใช้ปริมาณเป็นเครื่องกำหนด อันได้แก่ ก๊าซหุงต้ม ค่าไฟฟ้าและน้ำประปา ตลอดจนการซื้อขาย เพชร พลอย หรือทอง ฯลฯ ย่อมต้องการความถูกต้องในการวัดขนาด น้ำหนักและปริมาตรทั้งนั้น หากเกิดความผิดพลาดในการวัด ย่อมก่อให้เกิดปัญหาและความไม่เป็นธรรมแก่ผู้ซื้อหรือผู้ขาย ในทำนองเดียวกันงานวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีหรืองานอุตสาหกรรม ความผิดพลาดในการวัดปริมาณให้ถูกต้องอาจเป็นเหตุให้โครงการขนาดใหญ่พังพินาศลงได้

ในประเทศที่พัฒนาแล้วหรือประเทศที่กำลังพัฒนาหลายประเทศจะมีสถาบันแห่งชาติรับผิดชอบ และสามารถสอบเทียบมวลได้ละเอียดถูกต้องที่สุด ซึ่งถือเป็นเรื่องจำเป็นอย่างยิ่งโดยเฉพาะในงานวิทยาศาสตร์ การสอบเทียบจำเป็นต้องใช้วิธีการตามมาตรฐานสากล

Substitution method เป็นวิธีสอบเทียบมวลวิธีหนึ่งที่สถาบันทางมาตรฐานของนานาชาติยอมรับ และใช้วิธีนี้ในการสอบเทียบมวล การสอบเทียบมวลอาจสอบเทียบเพียงตุ้มน้ำหนักตัวเดียวหรือสอบเทียบเป็นกลุ่ม (ตุ้มน้ำหนักหลายตัว) ก็ได้ ที่สำคัญไม่ว่าจะสอบเทียบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัว จะต้องมีตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน (standard weight) ที่รู้ค่าแน่นอนอย่างน้อย 1 ตัวอยู่ในกลุ่มของตุ้มน้ำหนักที่จะสอบเทียบ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มีตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาด 100 กรัม ซึ่งได้รับการสอบเทียบจาก U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards (NBS) สามารถนำมาใช้ในการสอบเทียบมวลขนาดอื่นๆ ที่ต้องการสอบเทียบได้ ตุ้มน้ำหนักนี้ได้เก็บรักษาไว้ในภาชนะที่สามารถดูดอากาศออกได้เพื่อกันการเกิดสนิมและฝุ่นละอองหรือไอน้ำจับ ซึ่งจะทำให้น้ำหนักเปลี่ยนไป

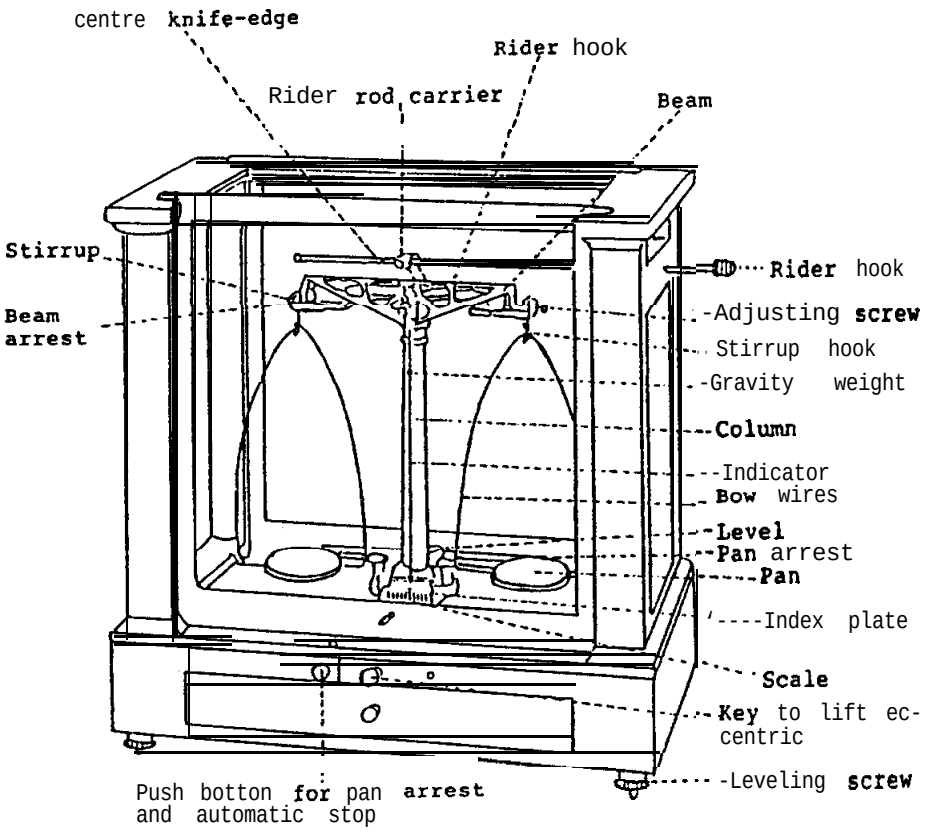
ในกรณีที่สงสัยว่าจะมีความคลาดเคลื่อนก็จะส่งกลับไปสอบเทียบอีก สถาบันที่ให้บริการสอบเทียบและเป็นที่เชื่อถือ ได้แก่ NBS, NPL (National Physical Laboratory) ของประเทศอังกฤษ NRLM (National Research Laboratory for Metrology) ของประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น นอกจากตุ้มน้ำหนักมาตรฐานแล้ว เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในการสอบเทียบมี เครื่องชั่งชนิดละเอียด ชนิดสองจาน (two pan balance) ตุ้มน้ำหนักที่ใช้สำหรับชั่งเปรียบเทียบ (tare weight) ตุ้มน้ำหนักขนาดเล็ก (sensitivity weight) และตุ้มน้ำหนักที่ต้องการจะเทียบ (weight)

ห้องปฏิบัติการ

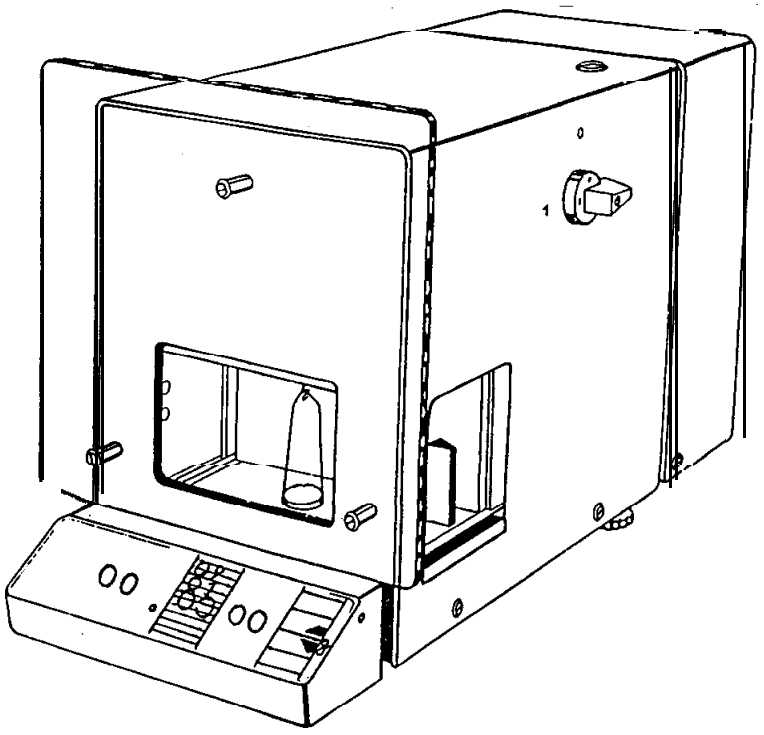
ห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐานสำหรับการสอบเทียบมวล ต้องเป็นห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้คงที่ มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 18°C - 22°C และความชื้นอยู่ระหว่าง 35-65% ยอมให้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่เกิน 0.5°C ต่อชั่วโมง และอัตราการเปลี่ยนแปลงความชื้นไม่เกิน 5% ต่อชั่วโมง ต้องเป็นห้องที่สะอาด ปราศจากฝุ่นละอองและกระแสลม โดยเฉพาะบริเวณที่วางมวล ควรใช้หนังชามัวร์หรือกระดาษกรองสำหรับวางมวลมาตรฐานและจะต้องไม่สัมผัสมวลมาตรฐานโดยตรงด้วยมือ

เครื่องชั่ง

เครื่องมือที่ใช้สอบเทียบมวล ก็คือ **เครื่องชั่ง** การชั่งให้ได้ความละเอียดถูกต้องสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องชั่งหลายขนาด เพราะเครื่องชั่งที่สามารถชั่งมวลขนาดใหญ่จะมีความละเอียดถูกต้องไม่สูง แต่เครื่องชั่งที่สามารถชั่งมวลขนาดเล็กๆ จะมีความละเอียดถูกต้องสูงกว่า ดังนั้น การสอบเทียบมวลแต่ละขนาดจึงต้องเลือกเครื่องชั่งให้เหมาะสม โดยพิจารณาค่าความไว (sensitivity) สามารถอ่านค่าละเอียดจากเครื่องชั่ง นอกจากนั้นยังต้องพิจารณาถึงความถูกต้องของเครื่องชั่งอีกด้วย



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งชนิด 2 จาน



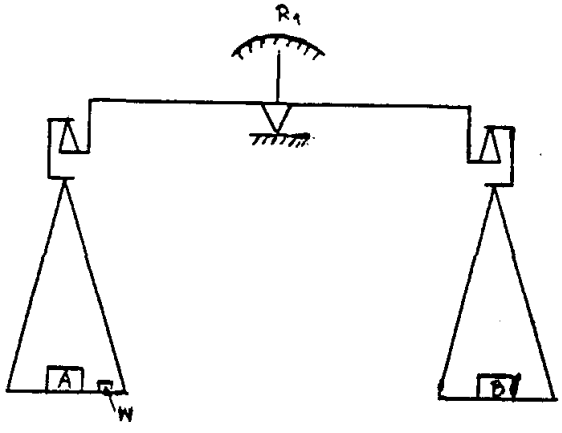
รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งกล

วิธีการสอบเทียบมวลมาตรฐาน

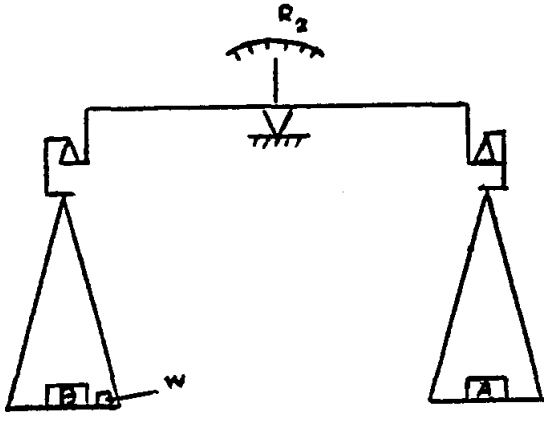
เครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบมวลมาตรฐาน เป็นเครื่องชั่งชนิด 2 จาน ใช้วิธี "double-double" หรือ "double-interchange" method ซึ่งมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

สมมติให้สอบเทียบมวลมาตรฐาน A กับมวลมาตรฐาน B ซึ่งระบุค่า M_c เท่ากัน โดยให้มวลมาตรฐาน B เป็นมวลมาตรฐานอ้างอิงและทราบค่าแน่นอนแล้ว และมวล w เป็นมวลขนาดน้อยๆ ที่ทราบค่าแล้ว (sensitivity weight) ซึ่งใช้เป็นตัวตรวจสอบ sensitivity ของเครื่องชั่ง

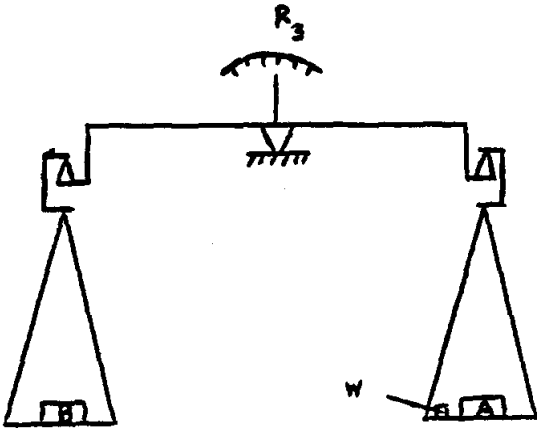
ขั้นที่ 1 ชั่งโดยวางมวล (A + W) ไว้บนจานซ้าย และมวล B ไว้บนจานขวา แล้วอ่านจุดหยุด ค่าที่อ่านได้เป็น R_1



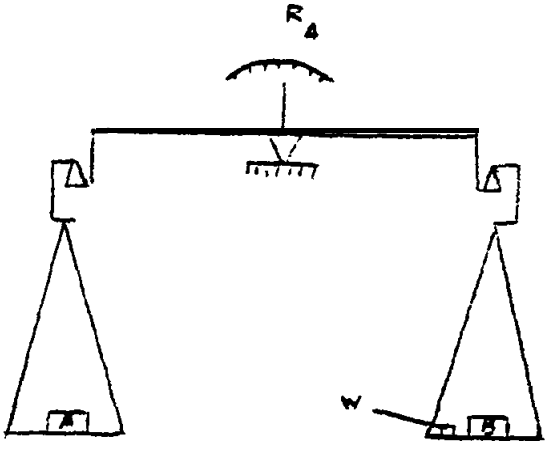
ขั้นที่ 2 ชั่งโดยวางมวล (B + W) ไว้บนจานซ้าย และมวล A ไว้บนจานขวา อ่านค่าจุดหยุด ค่าที่อ่านได้เป็น R_2



ขั้นที่ 3 ชั่งโดยวางมวล B ไว้บนจานซ้าย และมวล (A + W) ไว้บนจานขวา อ่านจุดหยุดเป็น R_3



ขั้นที่ 4 ชั่งโดยวางมวล A ไว้บนจานซ้าย และมวล (B + W) ไว้บนจานขวา อ่านจุดหยุดเป็น R_4



แล้วนำค่า R ต่างๆ ที่ได้มาคำนวณผลการชั่ง จากสมการ

$$A-B = w \frac{(R_1 - R_2 - R_3 \text{ t } R_4)}{(R_1 \text{ t } R_2 - R_3 - R_4)} \quad \ldots\ldots (13)$$

วิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบความปกติของการทำงานของเครื่องชั่งได้ทุกครั้งที่ทำการชั่ง

ตัวอย่างที่ 1 การสอบเทียบมวลมาตรฐานตัวอย่างขนาด 100 g กับมวลมาตรฐานอ้างอิงขนาด 100 g และมีค่า m_c = 99.999 **702** 01 g t 0.000 027 18 g ตามรายงานการสอบเทียบ ใช้ sensitivity weight 1 mg ด้วยวิธีการชั่งแบบ "double-interchange" method ได้ค่าดังนี้

R_1 = 14.42

R_2 = 14.27

R_3 = 10.11

R_4 = 10.27

$$\therefore \text{มวลตัวอย่าง} = 1 \text{ mg} \frac{(14.42-14.27-10.11+10.27)}{(14.42+14.27-10.11-10.27)} \text{t} 99.999\ 702\ 01\ \text{g t} 0.3\ \text{mg}$$

= 0.0373 mg t 99.999 702 01 g t 0.3 mg

= 100.000 039 g

หมายเหตุ มวล 0.3 mg เป็นมวลมาตรฐานซึ่งใช้ถ่วงให้เครื่องชั่งสมดุล

การตรวจสอบและสอบเทียบเครื่องชั่ง

การชั่งน้ำหนักเป็นวิธีการทางวิทยาศาสตร์อย่างหนึ่งที่ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติเชิงมวลของสารต่างๆ การชั่งน้ำหนักมีความสำคัญต่อสังคมมนุษย์จนเกือบถือได้ว่าเป็นส่วน

หนึ่งของชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะเกี่ยวข้องกับการซื้อขายต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้การชั่งน้ำหนักเป็นเกณฑ์ในการตัดสินและประเมินราคาสินค้าต่างๆ เพื่อรักษาความยุติธรรมระหว่างผู้ซื้อและผู้ขาย นอกจากนี้การชั่งน้ำหนักยังมีความสำคัญยิ่งในทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีด้วย โดยเฉพาะในการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพ และควบคุมคุณภาพของสินค้าที่ผลิตขึ้น ตลอดจนคุณภาพของวัตถุดิบที่นำมาใช้เพื่อการผลิต

สิ่งที่สำคัญที่สุดของการชั่งน้ำหนัก คือ ความถูกต้องของน้ำหนักที่ชั่งได้ ความผิดพลาดคลาดเคลื่อนของการชั่งที่เกิดขึ้นเสมอๆ นั้น หากมิใช่เกิดจากเจตนาของผู้ชั่งแล้ว ส่วนใหญ่พบว่าเกิดจากสาเหตุของเครื่องชั่งที่ใช้งานไม่มีความถูกต้องตรงตามมาตรฐานกำหนด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้งานมานาน ไม่เคยได้รับการสอบเทียบความถูกต้องตามกำหนดเวลา หรืออาจเนื่องมาจากเครื่องชั่งเหล่านั้นผลิตขึ้นไม่ตรงตามมาตรฐานกำหนดและไม่ได้รับการสอบเทียบความถูกต้องก่อนส่งออกจำหน่าย เพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาดคลาดเคลื่อนของการชั่งที่อาจเกิดขึ้นได้ ผู้ชั่งหรือผู้ที่จะซื้อเครื่องชั่งควรจะมีความรู้เกี่ยวกับเครื่องชั่งบ้างพอสมควร สำหรับขั้นตอนง่ายๆ ที่จะตรวจสอบหรือบำรุงรักษาเครื่องชั่ง มีดังนี้

1. **การตรวจสอบลักษณะทั่วไป** ได้แก่ ความสะอาดทั้งภายในและภายนอกเครื่องชั่ง ตลอดจนระบบการทำงานของกลไกต่างๆ ว่าทำงานปกติหรือไม่ หากตรวจพบข้อบกพร่องต้องแก้ไขพร้อมทั้งปรับแต่งให้เครื่องชั่งทำงานเป็นปกติ ทำความสะอาดด้วยแปรงเล็กๆ หรือปรับแต่งความไวของเครื่องชั่งให้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนด

2. **การตรวจสอบความไวของเครื่องชั่ง** ความไวของเครื่องชั่งเป็นตัวบอกถึงความสามารถของเครื่องชั่งในการตอบสนองต่อน้ำหนักของมวลที่ชั่ง ซึ่งประเมินได้จากค่าของมวลที่ชั่งและผลการชั่งมวลนั้น การทราบค่าความไวของเครื่องชั่งเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งชี้ถึงความถูกต้องของการชั่ง และเป็นตัวชี้บอกให้ทราบว่าเครื่องชั่งนั้นสามารถชั่งได้ต่ำสุดเท่าใด ความไวของเครื่องชั่งหาได้โดยการชั่งมวลมาตรฐาน แล้วคำนวณหาค่าของมวลที่ทำให้เข็มชี้ของเครื่องชั่งเบนไป 1 ช่องสเกลที่เล็กที่สุดของเครื่องชั่งนั้น

3. **การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่ง** ความถูกต้องของเครื่องชั่งหมายถึงความสามารถที่เครื่องชั่งจะอ่านผลการชั่งได้เท่ากันทุกครั้ง ในชุดหนึ่งของการชั่งภายใต้เงื่อนไขและสภาวะต่างๆ ที่เหมือนกัน การชั่งที่ต้องการความละเอียดสูงซึ่งจะต้องทำการชั่งหลายๆ ครั้งภายใต้เงื่อนไขและสภาวะอันเดียวกัน แต่ผลการชั่งที่อ่านได้จะไม่เท่ากันทุกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากมีตัวแปรต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ความไม่คงที่ภายในเครื่องชั่ง การตัดสินใจในการอ่านผลการชั่งของผู้ชั่ง และสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ที่ไม่อาจควบคุมได้ เป็นต้น

การตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่ง ทำได้โดยการชั่งมวลมาตรฐานซ้ำหลายๆ ครั้งภายใต้เงื่อนไขและสภาวะอันเดียวกัน แล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการชั่งนั้น หากค่าดังกล่าวมีค่าเกินกว่าค่าที่ระบุไว้จากการตรวจสอบของโรงงานผลิต หรือความแตกต่างของผลการชั่งที่ได้จากการชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่ามากกว่า 3 เท่าของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ระบุไว้โดยโรงงาน แสดงว่าเครื่องชั่งนั้นไม่มีความถูกต้อง และจำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงแก้ไข

การสอบเทียบเครื่องชั่ง การสอบเทียบเครื่องชั่ง ไม่ได้หมายถึงการซ่อมหรือการทำให้เครื่องชั่งทำงานดีขึ้น แต่เป็นการตรวจสอบการทำงานของเครื่องชั่งว่ามีการทำงานเป็นปกติหรือไม่ มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้องมากน้อยแค่ไหน และค่าของปริมาณที่อ่านได้จากเครื่องชั่งแต่ละครั้งนั้นสามารถเชื่อถือได้ถึงระดับใด ดังนั้นเมื่อเครื่องชั่งได้รับการสอบเทียบแล้ว ในรายงานผลการสอบเทียบจะประกอบด้วยการรายงาน

1. ความปกติของการทำงานของเครื่องชั่ง
2. ความแม่นยำของการอ่าน (repeatability of readings) แสดงระดับความถูกต้องของเครื่องชั่ง
3. ค่าแก้สำหรับการอ่าน (correction) แสดงความคลาดเคลื่อนของผลการอ่านค่าที่ถูกต้อง
4. ค่า sensitivity แสดงความไวของเครื่องชั่ง
5. ค่าความไม่แน่นอน (uncertainty) ของการสอบเทียบ

ในการสอบเทียบเครื่องชั่งสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ พอจะแบ่งชนิดของเครื่องชั่งตามวิธีการสอบเทียบได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่มีมวลมาตรฐานอยู่ภายในเครื่องกับ ชนิดที่ไม่มีมวลมาตรฐานอยู่ภายในเครื่อง ซึ่งมีข้อแตกต่างกันพอสังเขป ดังนี้

ชนิดที่มีมวลมาตรฐาน	ชนิดไม่มีมวลมาตรฐาน
1. มีมวลมาตรฐานขนาดต่างๆ อยู่ภายในเครื่อง	1. ไม่มีมวลมาตรฐานอยู่ภายในเครื่อง
2. มีทั้ง scale (หรือ digital display) และ dial setting	2. มีแต่ scale (หรือ digital display) ไม่มี dial setting
3. เมื่อวางวัตถุที่ต้องการหาค่ามวลบนจานเครื่องชั่ง จะต้องมีการปรับปุ่ม dial setting เพื่อให้อ่านค่าจาก scale (หรือ digital display) ได้	3. เมื่อวางวัตถุที่ต้องการหาค่ามวลบนเครื่องชั่ง จะอ่านค่าของมวลได้ทันทีจาก scale (หรือ digital display) โดยไม่ต้องปรับปุ่มใดๆ
4. มักได้แก่ เครื่องชั่งระบบกล (Mechanical balance) เครื่องชั่งระบบร่วมกล และอิเล็กทรอนิกส์	4. มักได้แก่ เครื่องชั่งระบบสปริง เครื่องชั่งระบบอิเล็กทรอนิกส์

ในการสอบเทียบเครื่องชั่ง โดยทั่วไปจะทดสอบ 4 รายการ คือ

1. **ตรวจสอบลักษณะทั่วไป** เป็นการตรวจสอบการทำงานของส่วนต่างๆ ของเครื่องชั่งว่าเป็นปกติดีหรือไม่ ปุ่มปรับต่างๆ ทำหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์หรือไม่ มีความสะอาดเพียงใด หากมีความผิดปกติของเครื่องชั่งจะต้องมีการแก้ไขก่อน จึงจะทดสอบในหัวข้อต่อๆ ไปได้

ผู้ใช้เครื่องชั่งต้องหมั่นทำความสะอาดเครื่องชั่ง และติดตั้งเครื่องชั่งบนโต๊ะที่แข็งแรงไม่สั่นสะเทือน ในที่ปราศจากฝุ่น กระแสลม และปรับระดับเครื่องชั่งให้อยู่ในแนวที่ถูกต้องอยู่เสมอ (โดยสังเกตลูกน้ำปรับระดับ)

2. **หาค่าความแม่นยำของการอ่าน (repeatability) ของเครื่องชั่ง** พิจารณาพิสัย (range) ของเครื่องชั่งว่ามีช่วงขนาดเท่าใด แล้วเลือกทดสอบหาค่าความ

แม่นยำของการอ่านที่ค่าต่างๆ ในพิสัยนั้นอย่างน้อยที่สุด 2 ค่า เพื่อดูว่าเครื่องชั่งมีความถูกต้องเพียงใด โดยสังเกตจากการกระจายของผลการชั่งมวลมาตรฐานอันเดียวกัน 10 ครั้งติดต่อกัน ซึ่งแสดงค่าด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และค่าแตกต่างสูงสุดของการอ่าน 2 ครั้งติดต่อกัน ถ้าค่าทั้งสองนี้ต่ำ แสดงว่ามีการกระจายน้อย เครื่องชั่งมีความถูกต้องสูง

3. **หาค่าแก้ (correction)** วัตถุประสงค์คือ ต้องการหาค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่อ่านได้ที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ถูกต้อง ทำโดยนำมวลมาตรฐานที่รู้ค่าแล้วขนาดต่างๆ มาชั่ง ความแตกต่างระหว่างค่าที่อ่านได้กับค่ามวลมาตรฐาน คือ ค่าของความคลาดเคลื่อน

ค่าของความคลาดเคลื่อนจะรายงานเป็นค่าแก้ กล่าวคือ

ค่าแก้ + ค่าที่อ่านได้ = ค่าที่ถูกต้อง

(สำหรับค่าที่อ่านได้ที่อยู่ระหว่างค่าที่ได้รับการสอบเทียบ ให้ใช้วิธีเทียบสัดส่วน)

กรณีของเครื่องชั่งชนิดไม่มีมวลมาตรฐาน โดยปกติมีเฉพาะ scale reading ซึ่งมีค่าพิสัยกว้าง เช่น เครื่องชั่งขนาด 200 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.0001 กรัม มีค่าที่อ่านได้ถึง 2 000 000 ค่า จึงใช้วิธีเลือกสอบเทียบที่ค่าต่างๆ ซึ่งห่างเท่าๆ กัน อาจเลือกทำบางช่วงให้มีจำนวนของค่าสอบเทียบมากกว่าช่วงอื่นเป็นกรณีพิเศษ ในกรณีที่ใช้งานในช่วงนั้นบ่อย หรือเป็นช่วงที่มีค่าน้อย ซึ่งความคลาดเคลื่อนเมื่อคิดเป็นร้อยละ จะสูงกว่าช่วงที่มีค่ามาก

สำหรับกรณีของเครื่องชั่งชนิดมีมวลมาตรฐานประกอบอยู่ภายใน นอกจากสอบเทียบ scale reading แล้ว ยังต้องสอบเทียบมวลมาตรฐานที่อยู่ภายในเครื่องด้วย โดยการสอบเทียบแต่ละ dial setting ต่างๆ นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้องเท่าใด

4. **ค่า sensitivity** จะเป็นค่าที่บอกความไวของเครื่องชั่ง ซึ่งหมายถึงมวลน้อยที่สุดที่ทำให้เครื่องชั่งอ่านค่าเปลี่ยนไป 1 ช่องสเกลที่เล็กที่สุด โดยปกติมีหน่วยเป็น mg/division ทำได้จากการชั่งมวลที่รู้ค่า แล้วคำนวณหาอัตราส่วนของค่ามวลมาตรฐานต่อจำนวนช่อง scale ที่เปลี่ยน

การแปลความหมายในรายงานผลการสอบเทียบเครื่องชั่งและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

1. **ค่าความแม่นยำของการอ่าน** (repeatability) เป็นค่าที่แสดงความถูกต้องของเครื่องชั่ง มีประโยชน์ดังนี้

1.1 ใช้สำหรับเลือกเครื่องชั่งเพื่อใช้ให้เหมาะสมกับงาน กล่าวคือ งานแต่ละชนิดต้องการความละเอียดถูกต้องไม่เท่ากัน เช่น งานหนึ่งต้องการใช้ตัวอย่างที่มีค่ามวลผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 0.0001 กรัม ก็ควรใช้เครื่องชั่งที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน ± 0.00003 กรัม ในขณะที่อีกงานหนึ่งต้องการใช้ตัวอย่างที่มีความผิดพลาดได้ไม่เกิน ± 0.0015 กรัม ควรใช้เครื่องชั่งที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน ± 0.0005 กรัม (ประมาณ 1/3) ในทำนองกลับกันจะทราบได้ว่าเครื่องชั่งที่ใช้อยู่เหมาะกับงานที่ทำอยู่ประจำหรือไม่

1.2 ใช้ในการเลือกซื้อเครื่องชั่ง เนื่องจากเครื่องชั่งที่มีค่า repeatability ดีกว่า จะมีราคาแพงกว่า ดังนั้นในการจะเลือกซื้อเครื่องชั่งให้พิจารณาดูว่าค่า repeatability ที่ระบุใน technical data เหมาะสมกับงานที่จะใช้หรือไม่

1.3 ใช้ตรวจสอบว่าเครื่องชั่งยังทำงานได้ดีเหมือนเดิมหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับค่า repeatability ใน technical data และในรายงานผลการสอบเทียบคร่าวๆ ก่อน

2. **ค่าแก้สำหรับการอ่าน** (Correction) มีประโยชน์โดยตรงในการทำให้การชั่งได้ผลถูกต้อง กล่าวคือ ค่าแก้สำหรับการอ่านเป็นค่าที่เมื่อนำมารวมกับค่าที่อ่านได้แล้ว จะเป็นค่าที่ถูกต้อง นั่นคือ

ค่าที่ถูกต้อง = ค่าที่อ่านได้ + ค่าแก้สำหรับการอ่าน

<u>ตัวอย่างที่ 2</u> ในการชั่งโดยใช้เครื่องชั่ง Mettler M 33AR ถ้าอ่านค่าได้ = 142.3280 กรัม

. . ค่าที่ถูกต้อง = 142.3280 กรัม t ค่าแก้

$$= 142.3280 \text{ กรัม } t \begin{cases} \text{ค่าแก้ของ dial reading 140 (dial setting หลัก 10-150)} \\ \text{ค่าแก้ของ dial reading 2 (dial setting หลัก 0-9)} \\ \text{ค่าแก้ของ scale reading 0.3280 กรัม} \end{cases}$$

$$= 142.3280 \text{ กรัม } t \begin{cases} +0.0005 \text{ กรัม} \quad \text{(ดูภาคผนวกที่ 3)} \\ -0.0001 \text{ กรัม} \\ \underline{\quad\quad}^{*} \text{ กรัม} \end{cases}$$

* <u>การคำนวณหาค่าแก้ของ scale reading 0.3280 กรัม</u>

ดูจากรายงานผลการสอบเทียบ (ภาคผนวกที่ 3) ในส่วนค่าแก้สำหรับการอ่าน scale ว่า 0.3280 อยู่ในช่วงใดของตาราง จะพบว่า 0.3280 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.250 กรัม - 0.500 กรัม

ให้ A = ค่า reading ขั้นต่ำของช่วง ในที่นี้ A = 0.250 กรัม

B = ค่า reading ขั้นสูงของช่วง ในที่นี้ B = 0.500 กรัม

a = ค่าแก้ของ reading ขั้นต่ำของช่วง ในที่นี้ a = +0.0001 กรัม

b = ค่าแก้ของ reading ขั้นสูงของช่วง ในที่นี้ b = +0.0003 กรัม

x = ค่าที่อ่านได้จาก scale reading 0.3280 กรัม

X = ค่าแก้ของ x

สูตร $$X = at \frac{(b-a)}{(B-A)} x\ (x-A)$$

$$= 0.0001 \text{ กรัม } t \frac{(0.0003 \text{ กรัม} - 0.0001 \text{ กรัม})}{(0.500 \text{ กรัม} - 0.250 \text{ กรัม})} x\ (0.3280 \text{ กรัม} - 0.250 \text{ กรัม})$$

$$= 0.00016 \text{ กรัม}$$

. . ค่าที่ถูกต้อง = 142.3280 + { +0.0005 กรัม
-0.0001 กรัม
+0.00016 กรัม

= 142.3280 กรัม t 0.00056 กรัม

= 142.32856 กรัม

= 142.3286 กรัม

<u>ตัวอย่างที่ 3</u> ในการใช้เครื่องชั่ง Sartorius Type 1702 ถ้าอ่านค่าได้ = 135.2408 กรัม

. . ค่าที่ถูกต้อง = 135.2408 t ค่าแก้

เนื่องจากมีscale reading อย่างเดียวดังนั้นการคำนวณค่าแก้ของscale reading มีดังนี้

1. ดูจากรายงานผลการสอบเทียบ (ภาคผนวกที่ 4) ในส่วนค่าแก้สำหรับการอ่าน scale ว่า 135.2408 กรัม อยู่ในช่วงใดของตาราง จะพบว่า 135.2408 กรัม อยู่ในช่วงระหว่าง 130.0000 กรัม - 140.0000 กรัม

ให้ A = ค่า reading ขั้นต่ำของช่วง ในที่นี้ A = 130.0000 กรัม

B = ค่า reading ขั้นสูงของช่วง ในที่นี้ B = 140.0000 กรัม

a =ค่าแก้ของreading ขั้นต่ำของช่วง ในที่นี้ a = -0.0002 กรัม

b =ค่าแก้ของreading ขั้นสูงของช่วง ในที่นี้ b = -0.0002 กรัม

x=ค่าที่อ่านได้จาก scale reading 135.2408 กรัม

x = ค่าแก้ของ x

จากสูตร $X = a \ t \ \frac{(b-a)}{(B-A)} \times (x-A)$

$$= -0.0002 \text{ กรัม } t \frac{[(-0.0002)-(-0.0002)]}{(140.0000-130.0000)} \times (135.2408 - 130.0000)$$

$$= -0.0002 \text{ กรัม}$$

$\therefore$ ค่าที่ถูกต้อง = 135.2408 + (-0.0002) กรัม

= 135.2406 กรัม

3. **ค่า sensitivity** เป็นค่าที่แสดงถึงความไวของเครื่องชั่งหรือขีดความสามารถของเครื่องชั่งที่จะบอกความแตกต่างของค่ามวลที่นำมาเปรียบเทียบ เครื่องชั่งที่มี sensitivity ดี คือเครื่องชั่งที่ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงมวลไปเพียงเล็กน้อย ก็จะสามารถบอกค่าที่เปลี่ยนแปลงนั้นได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังเป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบการปรับตั้งเครื่องชั่งว่าเหมาะสมกับ scale (หรือ digital display) หรือไม่

4. **ค่าความไม่แน่นอน** (uncertainty) ผลของการวัดหรือการสอบเทียบจะถือว่าไม่สมบูรณ์ นอกจากจะได้รวมเอาค่าความไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty of measurement) ทั้งหมดไว้ด้วย ความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องชั่ง อาจมีสาเหตุมาจาก

ก. ความไม่ถูกต้องของเครื่องชั่ง

ข. ความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบมวลมาตรฐานที่ใช้

ค. ความชำนาญของผู้ทำการสอบเทียบ

ง. ผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความกดดัน ความสั่นสะเทือน เป็นต้น

ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ที่ระบุไว้ หมายความว่ามีความเชื่อมั่นถึง 99% ว่าผลการสอบเทียบเป็นไปตามตัวเลขที่รายงานหรือมีโอกาสถึง 99% ที่ผลการสอบเทียบเป็นไปตามตัวเลขในรายงาน และมีโอกาสเพียง 1% ที่ผลการสอบเทียบไม่เป็นไปตามตัวเลขที่รายงาน จากตัวอย่างในภาคผนวกที่ 4 จะเห็นว่าเครื่องชั่งอ่านได้ 140.0000 กรัม มีค่าแก้เป็น -0.0002 กรัม มีค่าความไม่แน่นอนเป็น $\pm$0.0006 กรัม

หมายถึง รายงานผลการสอบเทียบนี้บอกว่า การที่เครื่องชั่งอ่านได้ 140.0000 กรัมนั้นมีโอกาสถึง 99% ที่ถูกต้องเป็น 139.9998 ± 0.0006 กรัม

ประโยชน์ของการรู้ค่าความไม่แน่นอน

1. ทำให้รู้ระดับความละเอียดถูกต้องของการสอบเทียบ ซึ่งควรจะสอดคล้องกับความถูกต้องของเครื่อง

2. ทำให้สามารถใช้เครื่องชั่งได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับความละเอียดของงาน และเป็นการใช้เครื่องชั่งได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

3. เป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในการระบุความไม่แน่นอนของผลการชั่งจากเครื่องชั่งนั้น

ตัวอย่างที่ 4 จากการสอบเทียบมวลมาตรฐานหนึ่งชุด ผลการสอบเทียบมีดังต่อไปนี้

มวลมาตรฐาน (กรัม)	ค่าที่ได้ (กรัม)	ค่าความไม่แน่นอน (กรัม)
100	100.001 670	± 0.000 1
50	50.001 205	± 0.000 1
30	30.000 495	± 0.000 07
20	20.000 180	± 0.000 06
10	9.999 935	± 0.000 06
5	5.000 220	± 0.000 06
3	3.000 190	± 0.000 06
2	2.000 095	± 0.000 05
1	1.000 075	± 0.000 05
0.5	0.499 975	± 0.000 05
0.3	0.299 960	± 0.000 05
0.2	0.199 990	± 0.000 05

มวลมาตรฐาน (กรัม)	ค่าที่ได้ (กรัม)	ค่าความไม่แน่นอน (กรัม)
0.1	0.100 005	± 0.000 05
0.05	0.050 045	± 0.000 05
0.03	0.030 000	± 0.000 05
0.02	0.020 030	± 0.000 05
0.01	0.010 020	± 0.000 05
0.005	0.005 030	± 0.000 05

หมายเหตุ : 1. ขณะที่ทำการทดสอบ ใช้อุณหภูมิ 23 ± 1°C และความชื้นสัมพัทธ์ 54 ± 5%

2. ระดับความเชื่อมั่นของความไม่แน่นอนที่ใช้คือ 99%

3. การทำงานโดยทั่วไปของเครื่องชั่งเป็นปกติ

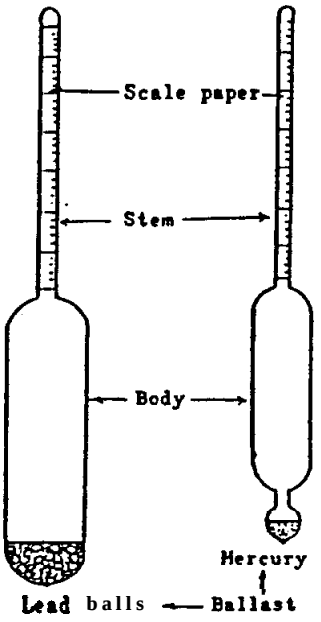
การสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์

(Hydrometer)

ในการกำหนดคุณภาพหรือชนิดของของเหลวที่เป็นสินค้าซื้อขายกันบางชนิด เช่น น้ำมันต่างๆ ความหวานของน้ำตาล ความเข้มข้นของกรดชนิดต่างๆ ฯลฯ นอกจากจะใช้คุณสมบัติทางเคมีแล้ว ยังใช้วิธีหาค่า "ความหนาแน่น" ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สามารถหาค่าได้รวดเร็วและประหยัด

วิธีหาค่าความหนาแน่นของของเหลวมีหลายวิธี วิธีที่สะดวกและง่าย คือ การใช้เครื่องมือที่เรียกว่า **ไฮโดรมิเตอร์** ซึ่งมีรูปร่างเป็นกระเปาะแก้วบรรจุเม็ดตะกั่วหรือปรอท และมีก้านยาว บนก้านจะมีขีดบอกค่าความหนาแน่นในช่วงต่างๆ ที่ไฮโดรมิเตอร์นั้นซึ่งสามารถอ่านค่าได้ทันที

เมื่อประสงค์จะหาค่าความหนาแน่นของของเหลวชนิดใด นำไฮโดรมิเตอร์ที่มีช่วงใกล้เคียงกับความหนาแน่นของของเหลวนั้นจุ่มลงในของเหลวซึ่งบรรจุในภาชนะแก้ว ไฮโดรมิเตอร์จะลอยอยู่ในของเหลวและอ่านค่าความหนาแน่นได้จากขีดแบ่งที่อยู่ตรงกับระดับของของเหลวนั้นพอดี



รูปที่ 3.5 ไฮโดรมิเตอร์

ดังนั้น ความถูกต้องและแม่นยำของไฮโดรมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความหนาแน่นของของเหลว ไม่ว่าจะใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหรือห้องปฏิบัติการการทดสอบจึงมีความสำคัญมาก ไฮโดรมิเตอร์ที่ซื้อมาใหม่หรือใช้งานมาเป็นเวลานาน ควรจะต้องทำการสอบเทียบความถูกต้องและแม่นยำ

การสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์ มี 2 วิธี คือ

1. โดยการสอบเทียบกับไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน(Standard hydrometer) ในของเหลวชนิดเดียวกัน

2. โดยการสอบเทียบกับของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่นแน่นอนหลายๆ ชนิด ตามขนาดช่วงต่างๆ ที่ต้องการ

การสอบเทียบวิธีแรกนั้น ต้องให้ค่าความไม่แน่นอนของค่าความหนาแน่นที่อ่านได้จากไฮโดรมิเตอร์มาตรฐาน มีขนาดของอันดับน้อยกว่าความถูกต้องของการสอบเทียบ

ส่วนวิธีที่สองใช้เวลานานและจะต้องทราบค่าความหนาแน่นที่ถูกต้องของของเหลวมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง

วิธีสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์

เมื่อนำไฮโดรมิเตอร์ใส่ในของเหลวแล้ว ไฮโดรมิเตอร์นั้นยังคงลอยอยู่ในของเหลว มวลของไฮโดรมิเตอร์ที่ชั่งในอากาศจะเท่ากับผลต่างระหว่างมวลของของเหลวซึ่งมีปริมาตรเท่ากับไฮโดรมิเตอร์ส่วนที่จมกับแรงเนื่องจากความตึงผิวของของเหลวกับไฮโดรมิเตอร์

กำหนดให้

มวลของไฮโดรมิเตอร์ (ที่ใช้สอบเทียบ) ชั่งในอากาศ = H_A

เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านไฮโดรมิเตอร์ = d

ของเหลวมีความตึงผิว = T

ความหนาแน่นของของเหลว = ρ

ปริมาตรของไฮโดรมิเตอร์ส่วนที่จมในของเหลวถึงขีดระดับ R = V_R

ค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก = g

แรงเนื่องจากความตึงผิวของของเหลวกับไฮโดรมิเตอร์ = $\pi dT/g$

มวลของไฮโดรมิเตอร์ที่หายไปในของเหลว = ρV_R

เมื่อไฮโดรมิเตอร์ลอยนิ่งในของเหลวที่มีความตึงผิว จะได้ว่า

มวลของไฮโดรมิเตอร์ในอากาศ = มวลของของเหลวซึ่งมีปริมาตรเท่ากับไฮโดรมิเตอร์ส่วนที่จม - แรงเนื่องจากความตึงผิวของของเหลวกับไฮโดรมิเตอร์

นั่นคือ $$H_A = \rho V_R - \pi dT/g \quad \text{------ (14)}$$

ในการสอบเทียบเมื่อจับแขวนไฮโดรมิเตอร์ให้ลอยอยู่ในระดับ R จะต้องชั่งมวลของไฮโดรมิเตอร์ในของเหลว (H_L) ด้วย

เมื่อใช้ของเหลว L เป็นของเหลวมาตรฐานในการสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์

ความตึงผิวของของเหลว L = T_L

ความหนาแน่นของของเหลว L = ρ_L

แรงเนื่องจากความตึงผิวของของเหลว L กับไฮโดรมิเตอร์ = $\pi dT_L/g$

มวลของไฮโดรมิเตอร์เมื่อชั่งในของเหลว L = H_L

มวลของของเหลวซึ่งมีปริมาตรเท่ากับไฮโดรมิเตอร์ส่วนที่จมที่ระดับขีด R = $\rho_L V_R$

$$\therefore \quad H_L = H_A + \pi dT_L/g - \rho_L V_R \quad \text{..... (15)}$$

แทนค่า V_R จากสมการ (14) ลงในสมการ (15) จะได้

$$H_L = H_A + \pi dT_L/g - \rho_L\{H_A + \pi dT/g\}/\rho$$

$$\rho[H_A - H_L + \pi dT_L/g] = \rho_L[H_A + \pi dT/g]$$

$$\therefore \quad \rho = \rho_L[(H_A + \pi dT/g)/(H_A - H_L + \pi dT_L/g)] \quad \text{..... (16)}$$

เพื่อแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาแน่นของอากาศที่มีผลต่อความหนาแน่นของของเหลว โดยให้ σ เป็นความหนาแน่นของอากาศ จะเป็น

$$\rho_L = \rho_L - \sigma$$

$$\rho = \rho - \sigma$$

ดังนั้น สมการ (16) จึงกลายเป็น

$$\rho = (\rho_L - \sigma)\left[\frac{H_A + \pi dT/g}{H_A - H_L + \pi dT_L/g} - 1\right] t\ \sigma \quad \ldots\ldots (17)$$

การหาค่าความตึงผิวของของเหลว (Surface tension) สำหรับค่าความตึงผิวของของเหลว(T_L) สามารถหาได้จากการทดลอง โดยนำหลอดแก้วชนิดเดียวกับที่ใช้ทำไฮโดรมิเตอร์ซึ่งทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน(D) มาจุ่มลงในของเหลวมาตรฐาน(L) แล้ว วัดระยะที่ของเหลว L ได่ขึ้นในหลอดแก้วเหนือระดับของเหลว L ในภาชนะที่บรรจุ แล้วหาค่า T_L ได้จากสมการ

$$\pi D T_L = \rho_L (h \pi D^2/4)$$

$$\therefore \quad T_L = \rho_L hD/4 \quad \ldots\ldots (18)$$

ซึ่ง ความตึงผิวของของเหลว L = T_L

ความหนาแน่นของของเหลว L = ρ_L

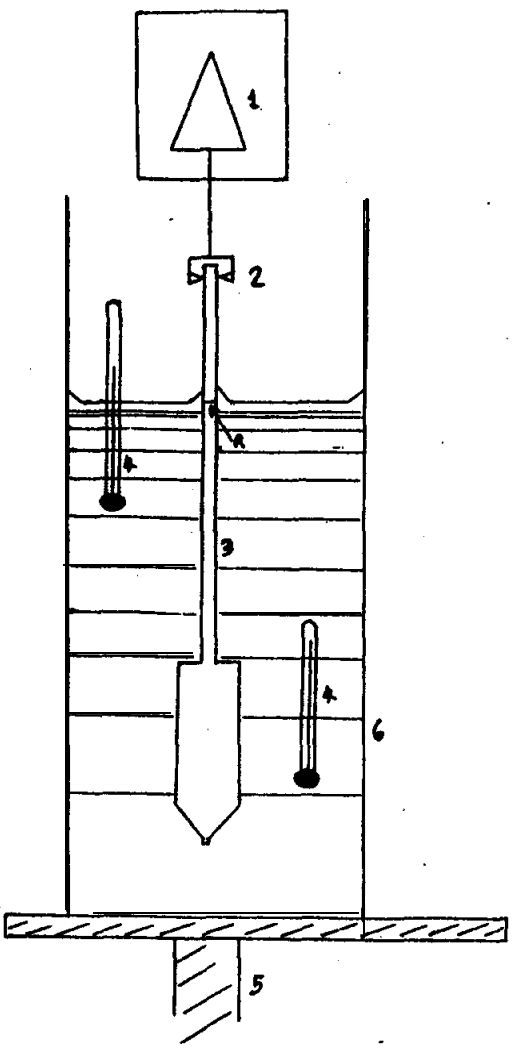
ระยะของของเหลว L ในหลอดแก้วที่สูงกว่าระดับของของเหลวภายนอก = h

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหลอดแก้ว = D

อนึ่งก่อนที่จะทำการสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์ทุกครั้ง ต้องทำความสะอาดเครื่องมือ อุปกรณ์ และไฮโดรมิเตอร์ทุกชิ้น เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวของของเหลวกับหลอดแก้ว โดยใช้สารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ร้อยละ 4 ในสารละลายที่มีกรดไนตริกและน้ำอยู่ในอัตราส่วน 50:50 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง สำหรับอุปกรณ์ที่ไม่ใช่แก้ว ให้ทำความสะอาดโดยการแช่ใน petroleum ether หรือ n-heptane ที่กลั่นซ้ำใหม่ แล้วเช็ดด้วยกระดาษกรองทุกครั้งที่จับต้องเครื่องมือ อุปกรณ์ และไฮโดรมิเตอร์ หลังจากการทำความสะอาดแล้ว

เมื่อใส่ไฮโดรมิเตอร์ (ซึ่งชั่งหามวลในอากาศแล้ว) ลงในบริเวณกึ่งกลางของกระบอกตวงซึ่งมีของเหลว (white spirit) โดยให้ปลายก้านด้านบนยึดติดอยู่กับส่วนล่างของจานเครื่องชั่งจานเดียว (รูปที่ 3.6) แล้ว ปล่อยให้เครื่องมือทั้งหมดและของ

เหลวอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสมดุล โดยมีเทอร์โมมิเตอร์ใส่อยู่ทั้งตอนบนและตอนล่างของของเหลวในกระบอกตวง เมื่อเปลี่ยนระดับของไฮโดรมิเตอร์ ส่วนที่จมอยู่ในของเหลว (V_R เปลี่ยน) โดยเลื่อนกระบอกตวงขึ้นลง จะสามารถอ่านค่ามวลของไฮโดรมิเตอร์เมื่อจมอยู่ในของเหลวได้จากเครื่องชั่ง และนำค่าต่างๆ ไปคำนวณหาความหนาแน่นได้จากสมการ (17)



รูปที่ 3.6 การสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์

1. เครื่องชั่งจานเดียว
2. ที่ยึดไฮโดรมิเตอร์กับจานเครื่องชั่ง
3. ไฮโดรมิเตอร์ส่วนที่อยู่ในของเหลวที่ระดับ R บนก้าน
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. ฐานที่วางกระบอกตวง สำหรับปรับระดับได้ เพื่อเปลี่ยนระดับ R
6. กระบอกตวง

<u>ตัวอย่างที่ 4</u> ทำการสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์ 3 อันซึ่งมีช่วง 0.760-0.805, 0.820-0.865 และ 0.880-0.920 ตามลำดับ ของเหลวมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ คือ เมทานอล (methanol) ที่มีความหนาแน่น 0.816 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิ 4 $\pm$ 0.5°C

ไฮโดรมิเตอร์	ค่าที่อ่านจากสเกล	ค่าความถ่วงจำเพาะที่ถูกต้อง ใช้วัดของเหลวที่มีความตึงผิวกับแก้ว = T mN/m
0.760-0.820	0.760	0.754 4 + 0.047 9 T
	0.765	0.761 3 t 0.046 9 T
	0.770	0.766 1 t 0.046 8 T
	0.775	0.775 0 t 0.049 2 T
	0.780	0.770 6 t 0.049 5 T
	0.785	0.784 2 t 0.049 8 T
	0.790	0.788 7 t 0.050 1 T
	0.795	0.793 1 t **0.050 4 T**
	0.800	0.800 1 t **0.050** 8 T
	0.805	0.804 7 t 0.051 1 T

ไฮโดรมิเตอร์	ค่าที่อ่านจากสเกล	ค่าความถ่วงจำเพาะที่ถูกต้อง ใช้วัดของเหลวที่มีความตึงผิวกับแก้ว = T mN/m
0.820-0.865	0.820	0.811 8 t 0.047 2 T
	0.825	0.818 6 t 0.047 6 T
	0.830	0.825 3 t 0.048 0 T
	0.835	0.832 0 t 0.048 4 T
	0.840	0.838 7 t 0.048 8 T
	0.845	0.843 2 t 0.049 1 T
	0.850	0.847 7 t 0.049 3 T
	0.855	0.852 2 t 0.049 6 T
	0.860	0.856 6 t 0.049 8 T
	0.865	0.863 3 t 0.050 2 T
0.880-0.920	0.880	0.870 0 t 0.040 5 T
	0.885	0.876 2 t 0.040 8 T
	0.890	0.882 3 t 0.041 0 T
	0.895	0.891 5 t 0.041 5 T
	0.900	0.897 6 t 0.041 8 T
	0.905	0.900 7 + 0.041 9 T
	0.910	0.906 8 t 0.042 2 T
	0.915	0.912 9 t 0.042 5 T
	0.920	0.916 0 t 0.042 6 T

ผลการสอบเทียบไฮโดรมิเตอร์ทั้ง 3 อันได้แสดงไว้ในตาราง ผู้ใช้ไฮโดรมิเตอร์นี้ สามารถคำนวณค่าความถูกต้องของความหนาแน่นของของเหลวได้จากตารางสอบเทียบ