

เจาะลึกมาตรฐานการทดสอบ ASTM D3985

1. ภาพรวมและวัตถุประสงค์หลัก (Overview & Core Purpose)

ASTM D3985 มีชื่ออย่างเป็นทางการว่า *Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor* เป็นมาตรฐานสากลที่กำหนดโดย ASTM International เพื่อใช้เป็นวิธีการมาตรฐานในการวัด อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (**Oxygen Gas Transmission Rate: OTR**) ผ่านแผ่นฟิล์มพลาสติก แผ่นพลาสติก แผ่นลามิเนต วัสดุผสม (Co-extrusions) หรือกระดาษ เคลือบพลาสติก

ปัญหาที่มาตรฐานนี้เข้ามาแก้ไขในอุตสาหกรรม

ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ (Packaging), อาหาร, ยา และเวชภัณฑ์ ตลอดจนสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ความแม่นยำสูง "ก๊าซออกซิเจน" คือปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ:

- การทำลายคุณภาพอาหาร:** เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ทำให้อาหารเหม็นหืน กลิ่นรสเปลี่ยน สีสันถดถอย และสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ
- การเสื่อมสภาพของยา:** ตัวยาสำคัญ (Active Pharmaceutical Ingredients: APIs) ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจนสูญเสียฤทธิ์ทางการรักษา
- การกัดกร่อนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์:** ออกซิเจนร่วมกับความชื้นทำให้เกิดสนิมและขึ้นสนิมขนาดเล็ก เกิดสนิมหรือคราบออกไซด์

ผู้ผลิตบรรจุภัณฑ์และเจ้าของแบรนด์จึงไม่สามารถคาดเดาคุณภาพฟิล์มจากเพียงความหนาได้ มาตรฐาน ASTM D3985 จึงถูกสร้างขึ้นเพื่อ จัดทำระเบียบวิธีวัดเชิงปริมาณที่มีความเที่ยงตรง สูง **repeatable** และเปรียบเทียบผลกันได้ทั่วโลก ช่วยให้วิศวกรสามารถประเมินอายุการเก็บรักษา (Shelf-life) ของสินค้าได้อย่างแม่นยำ

หัวใจสำคัญ (Core Philosophy)

แนวคิดหลักที่ขับเคลื่อน ASTM D3985 คือ "การวัดในสภาวะสถานะคงตัว (Steady-State Measurement) ด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าตามหลักการคูโลเมตริก (Coulometric Sensor)"

กระบวนการนี้อาศัยกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Electrolysis) ซึ่งระบุว่า ก๊าซออกซิเจนทุกๆ โมเลกุลที่ซึมผ่านแผ่นพลาสติกเข้ามา จะถูกพัฒนาไปยังขั้วแคโทดของเซนเซอร์คูโลเมตริกเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในระดับไมโครแอมแปร์ (μA) ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนโมเลกุลของออกซิเจน มาตรฐานนี้จึงเป็น **Absolute Method** ที่ไม่ต้องพึ่งพากราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) จากก๊าซอ้างอิงในการคำนวณ ขึ้นต้น ต่างจากวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (GC) หรือวิธีวัดความดันเปลี่ยนแปลง (Pressure Differential Method)

2. โครงสร้างและข้อกำหนดสำคัญ (Key Requirements & Structure)

การทดสอบตาม ASTM D3985 ประกอบด้วยข้อกำหนดทางเทคนิค สภาพแวดล้อม และขั้นตอนปฏิบัติที่เป็นภาคบังคับ เพื่อให้ได้ค่า OTR ที่น่าเชื่อถือ

สรุปโครงสร้างและองค์ประกอบของระบบทดสอบ

ระบบทดสอบมาตรฐานแบ่งออกเป็นส่วนหลัก ดังนี้:

- Diffusion Cell (ห้องทดสอบการซึมผ่าน):** แบ่งเป็น 2 ฝั่งอย่างสมมาตรโดยมีแผ่นพลาสติกตัวอย่างกั้นตรงกลาง
 - ฝั่งก๊าซทดสอบ (Test Gas Chamber): บรรจุก๊าซออกซิเจนความเข้มข้นสูง หรืออากาศบริสุทธิ์
 - ฝั่งก๊าซพา (Carrier Gas Chamber): บรรจุก๊าซพา (Carrier Gas) ซึ่งโดยทั่วไปคือ ก๊าซไนโตรเจนผสมไฮโดรเจน ($N_2 + H_2$) ที่ปราศจากออกซิเจน
- Coulometric Sensor:** เซนเซอร์เคมีไฟฟ้าที่มีปฏิกิริยาเฉพาะเจาะจงกับออกซิเจน
- Flow Controllers & Valves:** ระบบควบคุมอัตราการไหลของก๊าซอย่างสม่ำเสมอ
- Temperature & Humidity Control System:** ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของก๊าซทั้งสองฝั่ง

[Test Gas: O₂ (100% or Air)] ---> [Upper Chamber]

===== <-- Test Sample Film

[Carrier Gas: N₂/H₂ Mix] ---> [Lower Chamber] ---> [Coulometric Sensor] ---> [OTR Signal]

เจาะลึกข้อกำหนดสำคัญที่เป็นภาคบังคับ (Mandatory Requirements)

- 1. การบรรลุสภาวะสถานะคงตัว (Reaching Steady-State Condition):**

ข้อกำหนดที่สำคัญที่สุดคือ ห้ามบันทึกผลการทดสอบในขณะที่อัตราการซึมผ่านยังมีความผันผวน ตัวอย่างพลาสติกต้องถูกล้างไล่อากาศ (Purge) จนกระทั่งโมเลกุลออกซิเจนซึมผ่านแผ่นพลาสติกด้วยอัตราที่คงที่ สิ้นเชิง สัญญาณกระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์จะต้องคงที่ (Constant Voltage/Current Output) ติดต่อกันอย่างน้อยตามระยะเวลาที่กำหนด

- 2. การหาค่า Zero Baseline (System Zero Determination):**

ก่อนจะปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าฝั่งทดสอบ ผู้ทดสอบต้องปล่อยก๊าซพา (N_2) ผ่านทั้งสองฝั่งของ Diffusion Cell เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าพื้นฐาน (I_0 หรือ Zero Current) ที่เกิดจากออกซิเจนตกค้างในระบบหรือการรั่วไหลเพียงเล็กน้อย ค่า I_0 นี้จะถูกนำไปหักออกจากกระแสไฟฟ้าขณะทดสอบ (I_e)

- 3. การควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างเข้มงวด (Temperature & Relative Humidity Control):

อัตราการซึมผ่านของก๊าซแปรผันตามอุณหภูมิอย่างมหาศาลตามกฎของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) มาตรฐาน ASTM D3985 กำหนดอุณหภูมิทดสอบมาตรฐานไว้ที่ $23^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ และต้องระบุความชื้นสัมพัทธ์ (RH) อย่างชัดเจน โดยปกติตาม D3985 จะทดสอบในสภาวะก๊าซแห้ง ($0\%RH$) หากต้องการทดสอบที่สภาวะมีความชื้นจะต้องอ้างอิงระเบียบเพิ่มเติม (เช่น ASTM F1927)

- 4. การคำนวณค่า OTR (Mathematical Formula & Units):

ค่า OTR ถูกนิยามคือ ปริมาตรก๊าซออกซิเจนที่ซึมผ่านพื้นที่พลาสติกต่อหนึ่งหน่วยเวลา ณ ความดันบรรยากาศ มีหน่วยมาตรฐานคือ $\text{cc}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ หรือในหน่วยอิมพีเรียล $\text{cc}/(100 \text{ in}^2 \cdot \text{day})$

สมการหลักในการคำนวณค่า OTR คือ:

$$OTR = \frac{(I_e - I_0) \times F}{A \times R_L}$$

โดยที่:

- I_e = กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ณ สภาวะคงตัว (Amperes)
- I_0 = กระแสไฟฟ้า Zero Baseline (Amperes)
- A = พื้นที่การซึมผ่านของแผ่นตัวอย่าง (m^2)
- F = ค่าคงที่การแปลงค่าจากกระแสไฟฟ้าเป็นปริมาตรก๊าซตามกฎของฟาราเดย์
- R_L = ความต้านทานโหลดของวงจรวัด (Ohms)

3. การนำไปใช้งานและตัวอย่างจริง (Practical Implementation & Examples)

กรณีศึกษา (Case Study): บริษัท ไทยพลาสติก บรจักษ์ จำกัด

บริษัท ไทยพลาสติกฯ เป็นผู้ผลิตฟิล์มลามิเนตหลายชั้น (Multilayer Barrier Film) สำหรับส่งโรงงานแปรรูปเนื้อสัตว์ส่งออกเดิมที่เจอปัญหาสินค้าถูกตีกลับจากต่างประเทศ เนื่องจากเนื้อสดที่บรรจุในถุงสูญญากาศเกิดการเปลี่ยนสีจากแดงเป็นน้ำตาลเทาภายในเวลาเพียง 7 วัน ทั้งที่ตามสเปกต้องเก็บได้ 21 วัน

การสืบสวนพบว่า แผนก QC เดิมใช้วิธีวัดความหนาฟิล์มและทดสอบแรงดึงเท่านั้น โดยไม่ได้วัดค่า OTR ที่แท้จริง เมื่อนำมาตรฐาน ASTM D3985 เข้ามาปรับใช้ในห้องปฏิบัติการ R&D และ QA บริษัทพบว่า ชั้นกั้นก๊าซ (EVOH) เกิดความย่นและหนาไม่สม่ำเสมอระหว่างกระบวนการ Co-extrusion ทำให้ค่า OTR พุ่งสูงถึง $15 \text{ cc}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ (จากมาตรฐานที่คุมไว้ไม่เกิน $1.0 \text{ cc}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$) การควบคุมด้วย ASTM D3985 ช่วยให้บริษัทปรับปรุงกระบวนการผลิตจนได้ OTR อยู่ที่ $0.45 \text{ cc}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ และลดอัตราการเคลมสินค้าเหลือ 0%

สถานการณ์จำลอง (Scenario): วันทำงานจริงของนักวิชาการ QA ในการทดสอบตาม ASTM D3985

[ขั้นตอนที่ 1: เตรียมตัวอย่าง] ---> [ขั้นตอนที่ 2: ติดตั้งและทำการปั๊ม] ---> [ขั้นตอนที่ 3: ไล่ออกซิเจน (Purge)]

|

[ขั้นตอนที่ 5: ประมวลผล OTR] <--- [ขั้นตอนที่ 4: ปลดปล่อยแก๊ส O₂ & รอ Steady State] <---

1. การเตรียมชิ้นงาน (Sample Preparation):

เจ้าหน้าที่ผู้ตัดฟิล์มลามิเนตจากม้วนผลิตเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 108 mm ตรวจสอบด้วยตาเปล่าใต้แสงไฟเพื่อมั่นใจว่าไม่มีรอยขีดข่วน รอยพับ หรือรอยเข็มุด (Pinholes)

2. การติดตั้งเข้า Diffusion Cell:

เจ้าหน้าที่ทาจารบีสุญญากาศ (High-vacuum silicone grease) บางๆ บนขอบกาสเก็ต (Gasket) ของห้องทดสอบ เพื่อป้องกันแก๊สภายนอกรั่วซึม จากนั้นวางฟิล์มลงไป ชันสกรูรอบห้องทดสอบด้วยประแจปอนด์ (Torque Wrench) เพื่อให้แรงกดสม่ำเสมอเท่ากันทุกจุด

3. การล้างระบบและเช็คค่า Zero (Purging & Zero Baseline):

เปิดแก๊ส N₂ (ความบริสุทธิ์ 99.999%) ไหลผ่านทั้งฝั่งบนและฝั่งล่างด้วยอัตราไหล 10 ml/min อุปกรณ์จะล้างไล่อากาศที่ค้างอยู่ออกไปทั้งหมด กระบวนการนี้อาจใช้เวลา 2-4 ชั่วโมง จนกระทั่งค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากคูโลเมตริกเซนเซอร์นิ่งสนิท บันทึกค่านี้เป็น I₀

4. เริ่มการทดสอบการซึมผ่าน (Testing Phase):

ระบบทำการสลับก๊าซทางฝั่งบน ให้เป็นก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ 100% (O₂) ส่วนฝั่งล่างยังคงเป็น N₂ พัดพาโมเลกุลออกซิเจนที่ซึมผ่านฟิล์มไปหาเซนเซอร์ อุณหภูมิถูกควบคุมไว้ที่ 23°C

5. การอ่านผลสถานะคงตัว (Steady-State Evaluation):

เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง กราฟ OTR ค่อยๆ ไตร่ระดับขึ้นและเริ่มเป็นเส้นตรงขนานกับแกนเวลา (ต่างกันไม่เกิน 1% ในช่วง 1 ชั่วโมง) ระบบคอมพิวเตอร์ประมวลผลคำนวณได้ค่า $OTR = 1.2 \text{ cc}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ เจ้าหน้าที่พิมพ์รายงานผลออกตามมาตรฐานเพื่ออนุมัติปลดปล่อยม้วนฟิล์มล็อตดังกล่าวออกสู่การขาย

4. ประโยชน์ที่จะได้รับและข้อควรระวัง (Benefits & Pitfalls)

ผลลัพธ์เชิงบวกต่อธุรกิจและกระบวนการทำงาน

- ความแม่นยำและเที่ยงตรงระดับสูง (High Accuracy & Sensitivity): คูโลเมตริกเซนเซอร์สามารถวัดค่า OTR ได้ต่ำถึงระดับ $0.005 \text{ cc}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ ซึ่งจำเป็นอย่างมากสำหรับบรรจุภัณฑ์กั้นก๊าซสูง (High-barrier films)

- **การยอมรับในระดับสากล (Global Acceptance):** ใ้รับรองผลการทดสอบ (COA) ที่ระบุว่าทดสอบตาม ASTM D3985 เป็นการสร้างความน่าเชื่อถือให้กับลูกค้าระดับต่างประเทศ ทำให้ผ่านการรับรองมาตรฐานการค้าได้ง่าย
- **ลดต้นทุน R&D และลดระยะเวลาการนำสินค้าเข้าสู่ตลาด (Time-to-Market):** ทำให้ทีมวิจัยรู้ผลประสิทธิภาพบรรจุภัณฑ์ได้ภายในไม่กี่ชั่วโมงหรือวัน แทนที่จะต้องรอทำอายุการเก็บรักษาจริง (Real-time Shelf-life Study) นานนับปี

หลุมพรางและข้อผิดพลาดที่มักพบเจอ (Common Pitfalls)

- **1. การรั่วซึมบริเวณขอบชิ้นงาน (Edge Leakage):**

เป็นข้อผิดพลาดที่พบบ่อยที่สุด เกิดจากการทาจารบีสูญญากาศหนาเกินไปจนทะลักเข้าพื้นที่ทดสอบ หรือทาบางเกินไปจนอากาศภายนอกซึมเข้า ทำให้ค่า OTR สูงกว่าความเป็นจริงอย่างมหาศาล

- **การป้องกัน:** ใช้กาสเกิดคุณภาพสูง และฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ให้ใช้ปริมาณจารบีอย่างเหมาะสม และใช้ประแจปอนด์ขันสกรูทุกครั้ง

- **2. การละเลยปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ (Ignoring Relative Humidity Effects):**

พลาสติกบางชนิด เช่น EVOH หรือ Nylon (Polyamide) มีคุณสมบัติไวต่อความชื้นสูงมาก (Hydrophilic) เมื่อความชื้นสูงขึ้น โครงสร้างพอลิเมอร์จะขยายตัวทำให้ค่า OTR เพิ่มขึ้นหลายสิบเท่า หากทำการทดสอบตาม ASTM D3985 ที่สภาวะแห้ง (0%RH) เพียงอย่างเดียว จะได้ค่า OTR ที่ดีมาก แต่นำไปใช้งานจริงในตู้แช่ที่มีความชื้นสูงแล้วสินค้าเสีย

- **การป้องกัน:** ต้องเข้าใจข้อกำหนดว่า ASTM D3985 เน้นสภาวะแห้ง หากต้องการทดสอบที่สภาวะชื้นต้องใช้อุปกรณ์ที่รองรับการปรับความชื้นตามมาตรฐาน ASTM F1927

- **3. การบันทึกผลก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว (Premature Data Collection):**

พลาสติกที่มีความหนามาก หรือโครงสร้างซับซ้อน อาจใช้เวลาในการให้ออกซิเจนอิ่มตัวและซึมผ่านคงที่นานเป็นวัน หากใจร้อนบันทึกผลขณะที่กราฟยังไม่นิ่ง จะได้ค่า OTR ที่ต่ำกว่าความเป็นจริง

- **4. การเสื่อมสภาพของ Coulometric Sensor:**

เซนเซอร์ชนิดนี้มีอายุการใช้งานจำกัดหากสัมผัสกับออกซิเจนความเข้มข้นสูงเป็นเวลานานเกินไป หรือโดนสารเคมีกัดกร่อนจากตัวอย่างพลาสติกที่มีการระเหยของตัวทำละลาย (Solvent Outgassing) ส่งผลให้ค่าอ่านได้ดริฟต์ (Drift) หรือการตอบสนองช้าลง

5. แผนการเริ่มต้น (Actionable Roadmap)

หากองค์กรของคุณต้องการเริ่มนำมาตรฐาน ASTM D3985 มาใช้ในองค์กร ไม่ว่าจะเพื่อสร้างห้องปฏิบัติการ QA หรือเพื่อปรับปรุงการจัดซื้อบรรจภัณฑ์ สามารถดำเนินงานตาม 5 ขั้นตอนปฏิบัติดังนี้:

[Step 1: กำหนดสเปก] —> [Step 2: จัดเตรียม Lab] —> [Step 3: สอบเทียบและทวนสอบ]

|

[Step 5: รวมเข้ากับระบบ QA] <— [Step 4: จัดทำ SOP และอบรม] <—

Step 1: กำหนดข้อกำหนดความต้องการ (Requirement & Material Mapping)

รวบรวมข้อมูลโครงสร้างพลาสติกทั้งหมดที่องค์กรผลิตหรือใช้งาน ประเมินระดับ OTR ที่คาดหวัง เพื่อเลือกช่วงการวัด (Measurement Range) ของเครื่องมือให้เหมาะสม เช่น หากเป็นฟิล์มถุงขนมทั่วไป อาจใช้เครื่องระดับกลาง แต่หากเป็นฟิล์มยารักษาโรค ต้องเลือกเครื่องที่มีความไวสูงมาก (High-Sensitivity Sensor)

Step 2: จัดเตรียมโครงสร้างพื้นฐานห้องปฏิบัติการ (Infrastructure Preparation)

จัดเตรียมห้องปฏิบัติการทดสอบพลาสติกให้อยู่ในสภาวะควบคุม:

- ระบบปรับอากาศควบคุมอุณหภูมิ $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- ติดตั้งระบบท่อก๊าซ High-Purity Nitrogen (99.999%) และ High-Purity Oxygen
- ติดตั้งตัวกรองความชื้นและตัวดักจับออกซิเจน (Oxygen Traps) บนสายก๊าซพา เพื่อป้องกันสิ่งปนเปื้อนเข้าสู่เซนเซอร์

Step 3: การทวนสอบและสอบเทียบระบบ (System Validation & Calibration)

ก่อนเปิดใช้งานจริง ต้องทำการทวนสอบระบบด้วย Standard Reference Film (ฟิล์มอ้างอิงที่สามารถสวกลับได้ถึง NIST) เช่น ฟิล์ม Polyester (PET) ที่ทราบค่า OTR แน่นนอน เพื่อทดสอบว่าเครื่องมืออ่านค่าอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ($\pm 5\%$)

Step 4: จัดทำระเบียบปฏิบัติงานมาตรฐานและฝึกอบรม (SOP & Personnel Training)

เขียนเอกสาร Standard Operating Procedure (SOP) ตามข้อกำหนด ASTM D3985 โดยระบุขั้นตอนอย่างละเอียด:

- วิธีการตัดและการทำความสะอาดชิ้นงาน
- เทคนิคการหาจريبและการประกอบ Diffusion Cell
- กำหนดเกณฑ์การตัดสินสภาวะคงตัว (Steady-State Criteria)
- ฝึกอบรมเจ้าหน้าที่และทดสอบความสามารถในการทดสอบซ้ำ (Repeatability Test)

Step 5: เชื่อมโยงเข้าสู่ระบบบริหารคุณภาพ (Integration into QA/QC System)

บรรจุการทดสอบ OTR ตาม ASTM D3985 ลงในแผนการสุ่มตรวจประจำล็อต (Sampling Inspection Plan) สำหรับการรับเข้าวัตถุดิบ (Incoming QC) และการปล่อยสินค้าออก (Final QA) พร้อมกำหนดค่าขีดจำกัดการยอมรับ (Acceptance Criteria) ใน Specification Sheet ของสินค้า