บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัตถุเจือปนอาหาร (Food additive)

วัตถุเจือปนอาหาร [2] มีคำจัดความตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 84 ว่า วัตถุที่ตามปกติมิได้ใช้เป็นอาหาร หรือเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาหาร ไม่ว่าวัตถุนั้นจะมีคุณค่าทางอาหารหรือไม่ก็ตาม แต่ใช้เจือปนในอาหารเพื่อประโยชน์ทางเทคโนโลยีในการผลิต การบรรจุ การเก็บรักษา หรือการขนส่ง ซึ่งมีผลต่อคุณภาพหรือมาตรฐาน หรือลักษณะของอาหาร และหมายความรวมถึงวัตถุที่มิได้ใช้เจือปนอาหาร แต่ใช้รวมอยู่กับอาหารเพื่อประโยชน์ดังกล่าวข้างต้น

ในปัจจุบันวัตถุเจือปนอาหาร ได้มีการอนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากกว่า 2,500 ชนิด โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ [3] คือกลุ่มของวัตถุกันเสีย (Preservatives) เช่น กรดเบนโซอิก กรดซอร์บิก กรดโพรพิโอนิก ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น กลุ่มของสารที่ใช้เพื่อปรับความเป็นกรด (Acidifiers) เช่น กรดอะซิติก กรดอะดิปิก กรดซิตริก กรดแล็กติก กรดมาลิก เป็นต้น สารป้องกันการหืน (Antioxidants) เช่น บีเอชเอ (Butylated hydroxy anisole) บีเอชที (Butylated hydroxy toluene) เป็นต้น กลุ่มของสารจับโลหะ (Sequesting agents) เช่น กรดออกซาลิก กรดซิตริก อีดีทีเอ พอร์ไฟริน เป็นต้น กลุ่มของเอนไซม์ (Enzymes) เช่น ไลเปส ออกซิเดส รีดักเตส เป็นต้น กลุ่มของกัม (Chewing gum bases) เช่น กัมอารบิก (Gum arabic) โซเดียม คาร์บอกซี เมทธิล เซลลูโลส (Sodium carboxy methyl cellulose) เป็นต้น กลุ่มของอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) เช่น เลซิทิน โมโนและไดกลีเซอร์ไรด์ (mono- and diglycerides) เป็นต้น กลุ่มของวัตถุกันการรวมตัวเป็นก้อน (Antisticking agents) เช่น แคลเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมสเตรียเรต เป็นต้น กลุ่มของสารช่วยให้คงรูป (Quality sustainers) เช่น แคลเซียมกลูโคเนต แคลเซียมคลอไรด์ เป็นต้น กลุ่มของสีผสมอาหาร (Food colors) เช่น ทาร์ทราซิน เอโซรูบีน เออริทโทรซิน เป็นต้น กลุ่มของวัตถุปรุงแต่งกลิ่นและรส (Seasonings and Flavoring agents) เช่น กลิ่นผลไม้สังเคราะห์ เอมิลเอสเทอร์ คาเฟอีน แล็กโทน เป็นต้น กลุ่มของสารให้ความหวานแทนน้ำตาล (Artificial sweeteners) เช่น ไซลิทอล ซอร์บิทอล เอสพาร์เทม เอซีซัลเฟม-เค เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้สนใจศึกษากลุ่มของสารให้ความหวานแทนน้ำตาลคือเอซีซัลเฟม-เค กลุ่มของวัตถุกันเสียคือกรดเบนโซอิกและกรดซอร์บิก และกลุ่มของวัตถุปรุงแต่งกลิ่นและรสคือคาเฟอีน

1. เอซีซัลเฟม-เค (Acesulfame-K หรือ ASK)

เอซีซัลเฟม-เค เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาล ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความคงตัว สามารถละลายได้ดีในอาหารและไม่ให้พลังงานแก่ผู้บริโภค เอซีซัลเฟม-เค (หรือ 6-methyl-1,2,3-oxathiazine-4(*3H*)-one 2,2-dioxide potassium salt) ค้นพบโดย Clauss และ Jensen ในปี 1973 เป็นของแข็งผลึกสีขาว มีสูตรโมเลกุลคือ $C_4H_4KNO_4S$ (สูตรโครงสร้างดังภาพ 1) มีจุดหลอมเหลวที่ 225 °C และสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 235 °C มีความหวานกว่าน้ำตาลประมาณ 150-200 เท่า และละลายน้ำได้ดี (27 g ต่อน้ำ 100 mL ที่อุณหภูมิ 20 °C) เอซีซัลเฟม-เค นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสำหรับผู้ที่ต้องการจำกัดแคลอรี เช่น ผู้ที่ป่วยเป็นโรคเบาหวานหรือโรคอ้วน เป็นต้น

อันตรายจากเอซีซัลเฟม-เค พบว่าเมื่อบริโภคร่างกายจะไม่สามารถเมตาบอไลซ์ได้ และจะถูกขับถ่ายออกมาหมด นอกจากนี้การศึกษาถึงความเป็นพิษอื่นๆ รวมถึงการเป็นสารก่อมะเร็ง สารก่อกลายพันธุ์ และผลกระทบต่อระบบสืบพันธุ์ของเอซีซัลเฟม-เค พบว่าไม่ทำให้เกิดอาการผิดปกติใดๆ ต่อสัตว์ทดลองเลย [3] ดังนั้นจึงไม่มีข้อกำหนดปริมาณในการใช้โดยจะใช้ในปริมาณที่เหมาะสม (ปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดผลที่ต้องการภายใต้กระบวนการผลิต)

2. กรดเบนโซอิก (Benzoic acid หรือ BEN) และกรดซอร์บิก (Sorbic acid หรือ SOR)

กรดเบนโซอิกและกรดซอร์บิก เป็นวัตถุกันเสียที่ช่วยในการถนอม หรือยืดอายุการเก็บของอาหาร หรือช่วยในการยับยั้งการเจริญเติบโตหรือทำลายจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเน่าเสีย [4] โดยทำให้คุณสมบัติของผนังเซลล์จุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป หรือมีผลทำให้การทำงานของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ลดลง หรือมีผลต่อกลไกในการแบ่งเซลล์ของจุลินทรีย์ให้หยุดชะงัก เป็นสาเหตุให้จุลินทรีย์ลดปริมาณลงและตายไปในที่สุด [3]

กรดเบนโซอิก [5] (หรือ Carboxybenzene) เป็นของแข็งหรือเกล็ดสีขาว มีสูตรโมเลกุลคือ $C_7H_6O_2$ (สูตรโครงสร้างดังภาพ 1) มีจุดเดือดที่ 249 °C มีจุดหลอมเหลวที่ 122 °C มีค่า pK_a เท่ากับ 4.19 กรดเบนโซอิกนิยมใช้ในรูปของเกลือโซเดียมเบนโซเอต เนื่องจากเกลือโซเดียมเบนโซเอตละลายในน้ำได้ดี (74.2 g และ 66.0 g ต่อน้ำ 100 mL ที่อุณหภูมิ 100 °C และ 20 °C ตามลำดับ)

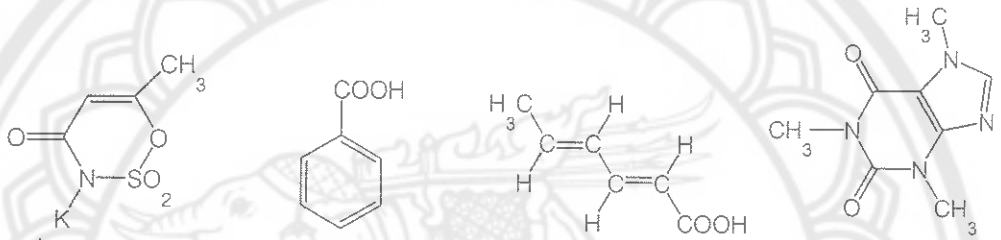
กรดซอร์บิก (หรือ 2,4-hexadienoic หรือ 2-propenylacrylic acid) เป็นกรดโมโนคาร์บอกซิลิก มีสูตรโมเลกุล คือ $C_6H_8O_2$ (สูตรโครงสร้างดังภาพ 1) เป็นของแข็งหรือเกล็ดสีขาว มีจุดเดือดที่ 228 °C มีจุดหลอมเหลวที่ 134.5 °C มีค่า pK_a เท่ากับ 4.76 ละลายน้ำได้ร้อยละ 0.16 ที่ 20 °C กรดซอร์บิกนิยมใช้ในรูปของเกลือโซเดียมซอร์เบตหรือโพแตสเซียมซอร์เบต เนื่องจากเป็นสารประกอบที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่มีรส เวลาใช้จึงไม่ทำให้กลิ่น รสและสีของอาหารเปลี่ยนแปลง

ปริมาณกรดเบนโซอิก หรือกรดซอร์บิก หรือเกลือของกรดทั้งสองนี้ที่กำหนดให้มีได้ในเครื่องดื่มจะต้องมีได้ไม่เกิน 200 mg ต่อเครื่องดื่ม 1 kg [6]

3. **คาเฟอีน** (Caffeine หรือ CAF)

คาเฟอีน เป็นวัตถุปรุงแต่งกลิ่นและรสของอาหารชนิดธรรมชาติ ไม่มีกลิ่น มีรสขม ละลายได้ดีในน้ำร้อนและลายได้เล็กน้อยในแอลกอฮอล์ พบในเมล็ดกาแฟ ใบชา และโกโก้ คาเฟอีน (หรือ 1,3,7-trimethylxanthine) เป็นของแข็งสีขาว มีสูตรโมเลกุลคือ $C_8H_{10}N_4O_2$ (สูตรโครงสร้างดังภาพ 1) มีจุดระเหิดที่ 178 °C มีจุดหลอมเหลวที่ 235-237.5 °C

ปริมาณคาเฟอีนที่อนุญาตให้ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารโดยเฉพาะเครื่องดื่มผสมคาเฟอีน ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข มีได้ไม่เกิน 50 mg ต่อหน่วยบรรจุ [7]



ภาพ 1 สูตรโครงสร้างของวัตถุเจือปนอาหารที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้

อัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรี (Ultraviolet-Visible spectrophotometry)

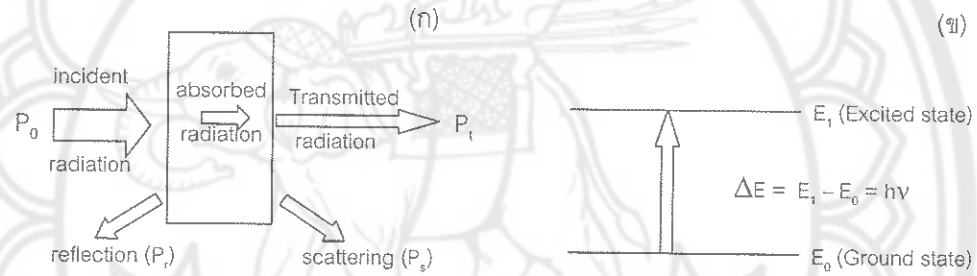
1. **หลักการและทฤษฎี**

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล (ที่ความยาวคลื่น (Wavelength หรือ λ) ประมาณ 190-800 nm) [8, 9, 10, 11] ของสารส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ หรือสารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นวิธีวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีดังกล่าวนี้ให้ความแม่น ความเที่ยง และมีความไว (sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้บางทีเรียกว่า อัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรี (Ultraviolet-Visible spectrophotometry หรือ UV-Vis spectrophotometry)

การวิเคราะห์โมเลกุลของสารในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล เกิดขึ้นได้เมื่อผ่านลำแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Beam of radiation) ในช่วงนี้ที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องเข้าไปยังสารละลาย พบว่าลำแสงบางส่วนถูกดูดกลืน (Absorbed) บางส่วนทะลุออกไป (Transmitted) บางส่วนสะท้อนกลับ (Reflected) และบางส่วนอาจกระเจิง (Scattered) อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือเกิดขึ้น

หลายๆ อย่างพร้อมกัน ดังภาพ 2 (ก) สำหรับแสงที่ทะลุผ่านออกไปยังเครื่องตรวจวัดสัญญาณ จะเห็นว่ามีความเข้มของแสงบางส่วนหายไป เรียกส่วนที่หายไปว่าแอบซอร์พชันสเปกตรัม (Absorption spectrum) พลังงานจากแสงที่สารละลายดูดกลืน (Absorbance) จะทำให้โมเลกุลในสารละลายเปลี่ยนระดับพลังงานจากสภาวะพื้น (Ground state) ไปยังสภาวะกระตุ้น (Excited state) ดังภาพ 2 (ข)

แอบซอร์พชันสเปกตรัมของโมเลกุลของสารในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล (พลังงานประมาณ 30-150 kcal/mol) จะให้สเปกตรัมที่กว้างเนื่องจากโมเลกุลประกอบไปด้วยการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic energy levels) ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของการสั่น และการหมุน (Vibrational and Rotational energy levels) ควบคู่ไปด้วย



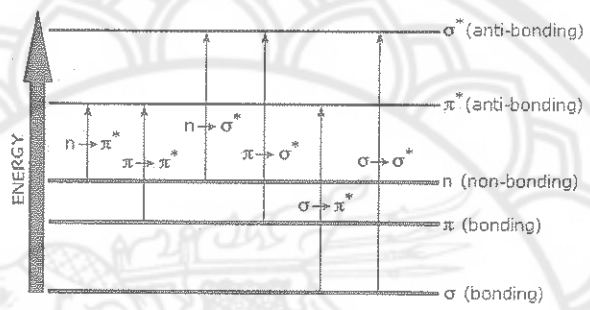
ภาพ 2 (ก) การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีหรือแสง เมื่อ P_0 คือ ความเข้มแสงก่อนการดูดกลืน และ P_t คือ ความเข้มแสงหลังการดูดกลืน และ (ข) กระบวนการเกิดการกระตุ้น

ที่มา: Skoog และ Leary [8]; แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ [9]

2. การดูดกลืนแสงของสารอินทรีย์ในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล

เนื่องจากสารอินทรีย์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิลได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Transition) (ดังภาพ 3) ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง คืออิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุด (Valence electrons) ที่อยู่ในสภาวะพื้นซึ่งประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนที่เกิดพันธะแล้ว (Bonding electrons) ได้แก่ sigma (σ) bonding electrons (เช่น –C-C-), pi (π) bonding electrons (เช่น –N=N-, -C=C-, -C≡C-) และอิเล็กตรอนที่ยังไม่เกิดพันธะ (Non-bonding electrons) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน อิเล็กตรอนเหล่านี้

เมื่อได้รับพลังงานสูงขึ้นจะอยู่ในสภาวะกระตุ้นที่เรียกว่า Anti-bonding orbitals คือ σ^* anti-bonding และ π^* anti-bonding การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานทุกชนิดของอิเล็กตอนในโมเลกุลของสารจะขึ้นอยู่กับชนิดของพันธะระหว่างอะตอมและโครงสร้างของโมเลกุลนั่นเอง โดยสามารถเรียงลำดับพลังงานที่เปลี่ยนแปลงจากน้อยไปหามากได้ดังนี้ $n \rightarrow \pi^*$, $\pi^* \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \sigma^*$, $\sigma \rightarrow \pi^*$ และ $\sigma \rightarrow \sigma^*$ ตามลำดับ



ภาพ 3 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนระดับพลังงาน

ที่มา: Reusch, 2006 [10]

หมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) [11] ของสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล มักเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated functional group) ซึ่งเรียกหมู่ฟังก์ชันนี้ว่าโครโมฟอร์ (Chromophores) โดยที่สามารถแบ่งได้เป็นสามกลุ่มใหญ่ คือ

1. โครโมฟอร์ที่มี multiple bond ระหว่าง 2 อะตอมของธาตุ โดยที่ไม่มี lon pair of electrons เช่นสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน -C=C-

2. โครโมฟอร์ที่มี multiple bond ระหว่าง 2 อะตอมของธาตุ โดยที่อะตอมของธาตุหนึ่งมี lon pair of electrons เช่นสารประกอบที่มีหมู่ฟังก์ชัน $-C=\ddot{O}$

3. โครโมฟอร์ที่มีวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) ได้แก่สารประกอบพวกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งจะให้ Absorption spectra ถึง 3 bands อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานจาก $\pi \rightarrow \pi^*$ เช่นเบนซีนเป็น Cyclic conjugated polyene จะให้ Strong absorption peak ที่ความยาวคลื่น 184 nm (ε_{max} = 60000) และให้ Weak band ซึ่งเรียกว่า E_2 band (Ethlenic band) ที่ 204 nm (ε_{max} = 7900) และให้ Weaker peak ที่เรียกว่า B band (Benzenoid) ที่ 256 nm (ε_{max} = 200)

สำหรับหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ดูดกลืนแสงหรือดูดกลืนแสงได้เพียงเล็กน้อยในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล โดยจะไปเกาะหรือเกิดพันธะกับโครโมฟอร์ และมีผลต่อแอบซอร์พชันสเปกตรัมของโครโมฟอร์ด้วย เรียกว่าออกโซโครม (Auxochrome) เช่น $-CH_3$, $-OH$, $-C_2H_5$ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สเปกตรัมของโครโมฟอร์มีค่าความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น (Bathochromic หรือ Red shift) หรือลดลง (Hypsochromic หรือ Blue shift) หรือจะทำให้การดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มขึ้น (Hyperchromic effect) หรือลดลง (Hypochromic effect) นั่นเอง

3. **การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยใช้วิธีอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรี**

การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยวิธีอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิลนี้จะใช้ปริมาณพลังงานของแสงที่สามารถดูดกลืน หรือที่ทะลุออกไป โดยสามารถอธิบายได้จากอัตราส่วนของ P_t ต่อ P_0 (ดังภาพ 2) เรียกว่า ทรานสมิตแทนซ์ (Transmittance หรือ T) ดังสมการ (1)

$$T = \frac{P_t}{P_0} \qquad (1)$$

แต่ค่าทรานสมิตแทนซ์ มักแสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแทนซ์และค่าการดูดกลืนแสงหรือแอบซอร์แบน (Absorbance) ดังสมการ (2) ดังนี้

$$\%T = 100\frac{P_t}{P_0}$$

$$\log \%T = \log 100\frac{P_t}{P_0} = \log 100 + \log\frac{P_t}{P_0}$$

$$\log \%T = 2 + \log\frac{P_t}{P_0} = 2 - \log\frac{P_0}{P_t}$$

$$\log\frac{P_0}{P_t} = 2 - \log \%T$$

$$A = 2 - \log \%T \qquad (2)$$

จากกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer and Lambert's law) [9] กล่าวไว้ว่า "ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มข้น" แสดงดังสมการ (3)

$$A = abc \qquad (3)$$

เมื่อ a เรียกว่าสภาพดูดกลืน (Absorptivity หรือ Specific extinction หรือ Extinction coefficient หรือ Bunsen coefficient) มีหน่วยเป็น L $g^{-1}cm^{-1}$

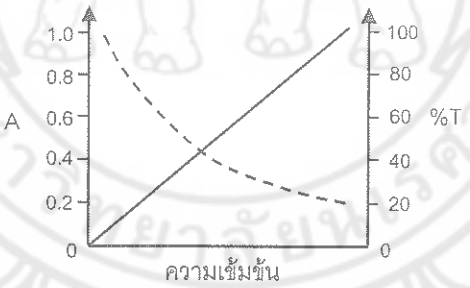
b เป็นความหนาของตัวกลาง มีหน่วยเป็น cm

c เป็นความเข้มข้นหน่วย g L^{-1}

ถ้า C เป็นความเข้มข้นหน่วย mol L^{-1} ค่า Absorptivity จะถูกแทนด้วยสภาพดูดกลืนโมลาร์ (Molar absorptivity หรือ Molar extinction coefficient หรือ Molar extinction หรือ ε) ดังสมการ (4) ซึ่งมีหน่วยเป็น L $mol^{-1}cm^{-1}$

$$A = \varepsilon bC \qquad (4)$$

และถ้าเขียนกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (A) กับความเข้มข้นจะได้กราฟเป็นเส้นตรง แต่ถ้าเขียนกราฟระหว่างทรานสมิตแทนซ์ (%T) กับความเข้มข้นจะได้กราฟเป็นเส้นโค้ง ดังภาพ 4

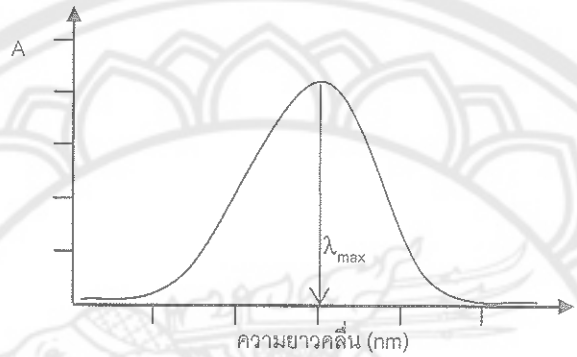


ภาพ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแทนซ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ [9]

จากกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารละลายได้หลายแบบ คือ

1. สารละลายที่มีองค์ประกอบเพียงชนิดเดียว (Single component) เป็นการวิเคราะห์ปริมาณของสารเพียงชนิดเดียวที่ละลายอยู่ในตัวทำละลาย และตัวทำละลายนั้นจะไม่มีค่าการดูดกลืนแสงไปรบกวนในช่วงของแอบซอร์พชันสเปกตรัมของสาร คำนวณจากสมการ (4) โดยใช้ค่า A ณ ตำแหน่งความยาวคลื่นสูงสุดของการดูดกลืน (λ_{max}) ดังภาพ 5



ภาพ 5 แอบซอร์พชันสเปกตรัมของสารที่มีเพียงองค์ประกอบเดียว

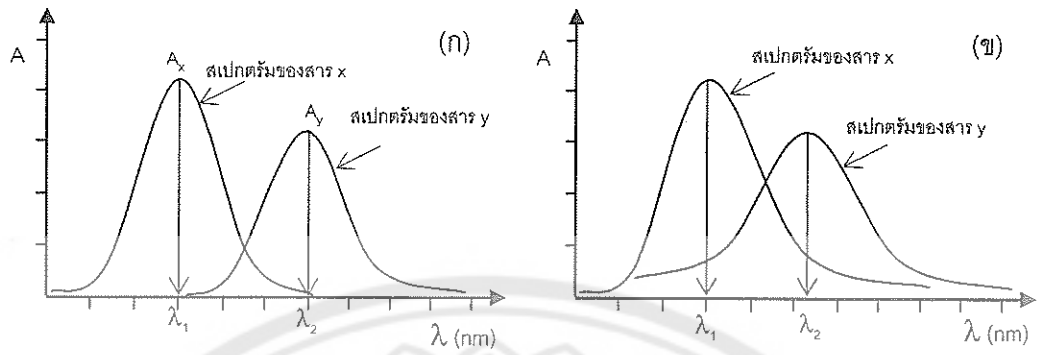
ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ [9]

2. สารละลายที่มีองค์ประกอบสองชนิด หรือมากกว่า (Binary components หรือ Multiple components) โดยทั่วไปนิยมทำได้ 2 แบบคือ

2.1 แบบที่ 1 ใช้หลักการรวมกันของค่าการดูดกลืนแสงของแอบซอร์พชันสเปกตรัม ซึ่งการวิเคราะห์ปริมาณแบบนี้เป็นการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารที่วัดได้เป็นผลรวมของค่าการดูดกลืนแสงของสารทุกตัวที่เป็นองค์ประกอบที่ความยาวคลื่นหนึ่งๆ เช่นในกรณีที่มีสารผสม 2 ชนิด (สาร x และสาร y) จะมีการเลือกความยาวคลื่น 2 ค่าที่เหมาะสมสำหรับสารแต่ละตัวเพื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสง (A) เช่น λ_1 และ λ_2 ดังภาพ 6 (ก) แอบซอร์พชันสเปกตรัมของ x และ y ไม่มีการซ้อนทับกัน หรือมีการซ้อนทับกันบางส่วน ดังนั้นจึงสามารถคำนวณหาปริมาณเหมือนกับสารละลายที่มีองค์ประกอบเพียงชนิดเดียว และในกรณีที่มีการซ้อนทับกันอย่างมากที่จุด λ_1 และ λ_2 ของแอบซอร์พชันสเปกตรัมของ x และ y ดังภาพ 6 (ข) ในการคำนวณเพื่อหาปริมาณของสาร x (C_x) และ y (C_y) จะอาศัยความสัมพันธ์ดังสมการ (5) และ (6) ดังนี้

ที่ λ_1; $$A_1 = \varepsilon_{1x}bC_x + \varepsilon_{1y}bC_y \quad (5)$$

ที่ λ_2; $$A_2 = \varepsilon_{2x}bC_x + \varepsilon_{2y}bC_y \quad (6)$$



ภาพ 6 แสดงแอบซอร์พชันสเปกตรัมของสาร 2 ชนิด
(ก) สเปกตรัมของสารแต่ละชนิดไม่ซ้อนทับกัน และ
(ข) สเปกตรัมของสารแต่ละชนิดที่มีการซ้อนทับกัน

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ [9]

2.2 แบบที่ 2 เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณโดยใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ [12] ซึ่งจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณอนุพันธ์แปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4. ส่วนประกอบของอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

อัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ เครื่องแบบลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดียวจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านไปยังสารตัวอย่าง เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวก และราคาไม่แพง สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่นั้น แสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ก่อนที่จะไปตกลงบนสารตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิงขณะที่อีกลำแสงหนึ่งจะผ่านไปยังสารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดจะสามารถทำการตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้

ส่วนประกอบที่สำคัญของอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทั้งชนิดแบบลำแสงเดี่ยวและแบบลำแสงคู่ มีดังนี้

แหล่งกำเนิดแสง (Light source) นิยมใช้หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวทีเรียมความดันต่ำ เนื่องจากเป็นแหล่งกำเนิดแสงต่อเนื่องที่ดีที่สุดตั้งแต่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 160-360 nm ส่วนหลอดทังสเตน จะให้แสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ช่วง Near-UV ช่วง Visible จนถึงช่วง IR

โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ทำหน้าที่ควบคุมลำแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ หรือเรียกว่าแสงพอลิโครเมติก (Polychromatic) ที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องออกเป็นลำแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยว หรือเรียกว่าแสงมอโนโครเมติก (Monochromatic radiation) ด้วยส่วนแยกแสง (Dispersing device) เช่น ปริซึม หรือ เกรตติง

เซลล์บรรจุสารตัวอย่าง (Sample cell) ทำมาจากแก้ว เซลล์ควอทซ์หรือฟิวส์ซิลิกา (Fused silica) สำหรับการวิเคราะห์ในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล ความยาวคลื่น 185-800 nm

เครื่องตรวจวัดสัญญาณ (Detector) เป็นเครื่องที่ใช้ตรวจและวัดแสง โดยจะทำการเปลี่ยนสัญญาณคลื่นแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

อุปกรณ์บันทึกสัญญาณ (Read out device) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ข้อมูลการดูดกลืนแสงหลังจากที่ลำแสงความยาวคลื่นเดี่ยวผ่านสารที่ต้องการวัดการดูดกลืนแสงตกกระทบที่อุปกรณ์รับสัญญาณแล้ว

สเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ (Derivative spectrophotometry)

1. **หลักการและทฤษฎี**

สเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ [12] เป็นเทคนิคอย่างง่ายในการขยายสัญญาณที่ซ้อนทับกัน โดยคำนวณจากการทำดิฟเฟอเรนทิเอชัน (Differentiation) ของสัญญาณปกติ หรือแอบซอร์พชันสเปกตรัม หรือ Zero order of derivative spectrum (D_0 spectrum) ก่อให้เกิดเดอริเวทีฟสเปกตรัม หรือสเปกตรัมอนุพันธ์ (Derivative spectrum) ที่มีลักษณะต่างไปจากเดิม โดยได้มีการนำวิธีดังกล่าวนี้มาใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณทางเภสัชภัณฑ์พบว่าสามารถกำจัดสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์และยังสามารถวิเคราะห์ยาผสมโดยไม่ต้องแยกออกจากกันก่อนได้

วิธีการประกอบด้วยการคำนวณหาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สอง หรือในอันดับที่สูงกว่าของแอบซอร์พชันสเปกตรัมเทียบกับค่าความยาวคลื่น ($\frac{d^n A}{d\lambda^n}$) และนำไปพล็อตแทนแอบซอร์พชันสเปกตรัมเทียบกับความยาวคลื่น (λ) ปกติค่าอนุพันธ์อาจจะได้จากสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยตรงหรือได้จากเครื่องอิเล็กทรอนิกที่ต่อเข้ากับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์อีกทีหนึ่ง ซึ่งค่าของอนุพันธ์ที่ได้จะถูกพล็อตระหว่างที่ทำการตรวจวัดสัญญาณการดูดกลืนแสง ผลที่ได้คือทำให้สัญญาณของสาร

เด่นชัดขึ้นและเป็นสัญญาณของสารนั้นจริงๆ เทคนิคนี้มีประโยชน์ในการขยายสัญญาณของสารในสารละลายในช่วงอัลตร้าไวโอเลต-วิสิเบิล

ในกรณีสารที่มีองค์ประกอบเพียงหนึ่งชนิดสามารถอธิบายการคำนวณค่าอนุพันธ์อันดับ 1-4 เพื่อนำไปสร้างสเปกตรัมอนุพันธ์ได้ดังนี้

1. อนุพันธ์อันดับ 1 (First order of derivative ; D_1) สามารถคำนวณได้จาก $\frac{dA}{d\lambda}$ โดยที่ลักษณะเฉพาะของ D_1 สเปกตรัมจะผ่านจุดศูนย์ตรงจุดที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของแอบซอร์พชันสเปกตรัม (ดังภาพ 7(ข))

2. อนุพันธ์อันดับ 2 (Second order of derivative ; D_2) สามารถคำนวณได้จาก $\frac{d^2A}{d\lambda^2}$ โดยมีลักษณะเฉพาะของ D_2 สเปกตรัมคือ จะเกิดจุดต่ำสุดตรง λ_{max} ของแอบซอร์พชันสเปกตรัม (ดังภาพ 7(ค))

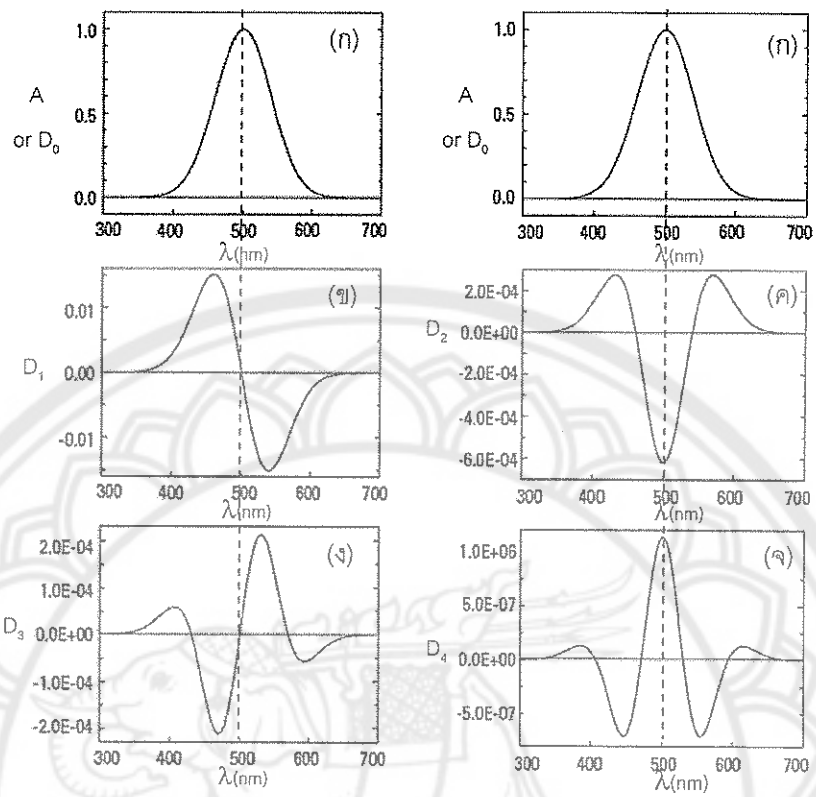
3. อนุพันธ์อันดับ 3 (Third order of derivative ; D_3) สามารถคำนวณได้จาก $\frac{d^3A}{d\lambda^3}$ โดยมีลักษณะเฉพาะของ D_3 สเปกตรัมคือ มีจุดต่ำสุดที่หนึ่งและตามด้วยจุดสูงสุดอีกที่หนึ่งโดยที่ตัดกับศูนย์ตรงกับ λ_{max} ของแอบซอร์พชันสเปกตรัม (ดังภาพ 7(ง))

4. อนุพันธ์อันดับ 4 (Forth order of derivative ; D_4) สามารถคำนวณได้จาก $\frac{d^4A}{d\lambda^4}$ โดยมีลักษณะเฉพาะของ D_4 สเปกตรัม จะมีจุดสูงสุดอยู่ตรงกลางของจุด λ_{max} ของแอบซอร์พชันสเปกตรัม (ดังภาพ 7(จ))

ในการคำนวณหาค่าอนุพันธ์ว่าจะเลือกใช้อันดับใดสำหรับนำไปวิเคราะห์หาปริมาณนั้นควรปรับให้พอเหมาะกับค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณที่ได้กับสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio หรือ S/N) ซึ่งจะมีผลต่อรูปร่างของสเปกตรัมที่จะพล็อต สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์นั้นจะต้องอาศัยกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตด้วย โดยที่ค่าอนุพันธ์ที่เปลี่ยนไปตามอันดับของอนุพันธ์จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นที่ λ หนึ่งๆ ดังสมการ (7) ดังนี้

$$D_n = \frac{d^nA}{d\lambda^n} = \frac{d^n\varepsilon}{d\lambda^n}bC \qquad (7)$$

เมื่อ n คือ อันดับของอนุพันธ์ (Order of derivative)



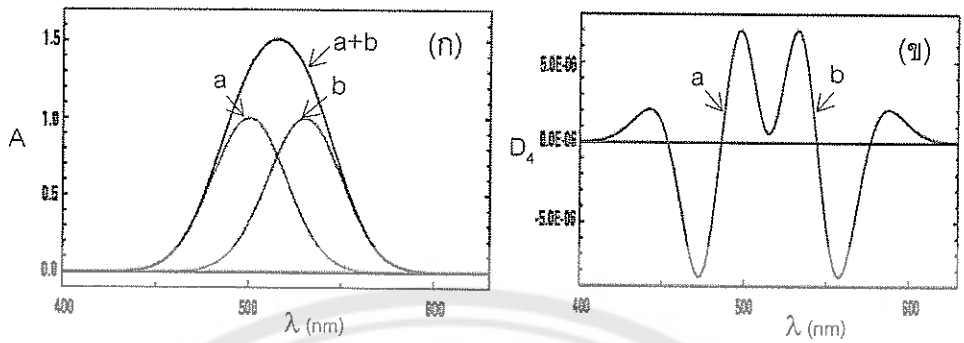
ภาพ 7 สเปกตรัมต่างๆ ของสาร (ก) แอบซอร์พชันสเปกตรัม (ข) D_1 สเปกตรัม (ค) D_2 สเปกตรัม (ง) D_3 สเปกตรัม และ (จ) D_4 สเปกตรัม

ที่มา: Owan, 1995 [14]

2. คุณสมบัติเด่นของวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์

จากการทำอนุพันธ์ของแอบซอร์พชันสเปกตรัม ทำให้เกิดคุณสมบัติเด่นของสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์หลายประการ คือ

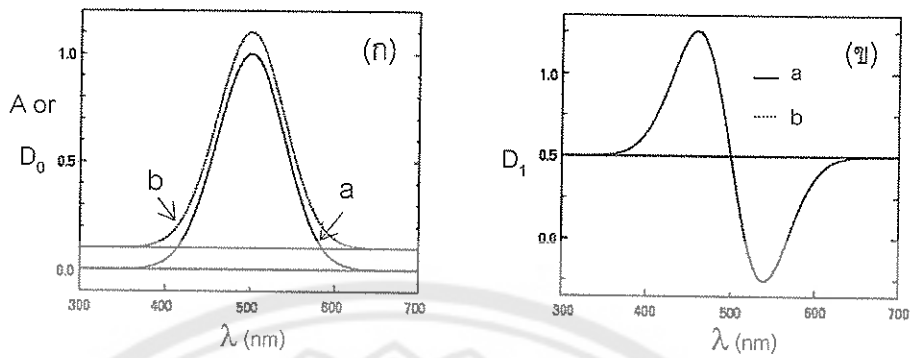
1. สามารถแยกแถบสเปกตราที่กว้างและซ้อนทับกันออกจากกันได้ (Resolution enhancement) เนื่องจากความกว้างของแถบบนสเปกตรัมอนุพันธ์ จะมีลักษณะแคบลงเมื่อการทำอนุพันธ์อันดับที่เป็นเลขคู่ที่มีอันดับสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแอบซอร์พชันสเปกตรัม ความกว้างของ Gaussian band หรือแถบหลักจะลดลงเหลือ 53%, 41% และ 34% ของแถบเริ่มต้นในแอบซอร์พชันสเปกตรัมหลังจากที่ทำอนุพันธ์อันดับที่ 2, 4 และ 6 ตามลำดับ คุณสมบัตินี้ทำให้โอกาสการซ้อนทับกันของแถบลดลง หรือสามารถแยกแถบต่างๆ ออกจากกันได้ ดังภาพ 8 จึงทำให้สามารถทำการวิเคราะห์สารที่มีสิ่งรบกวนมีความจำเพาะเจาะจงมากขึ้นได้



ภาพ 8 การแยกแถบสเปกตราที่กว้างและซ้อนทับกันออกจากกันของสาร a และ b (ก) แอบซอร์พ-ชันสเปกตรา และ (ข) D_4 สเปกตรา

ที่มา: Owan, 1995 [14]

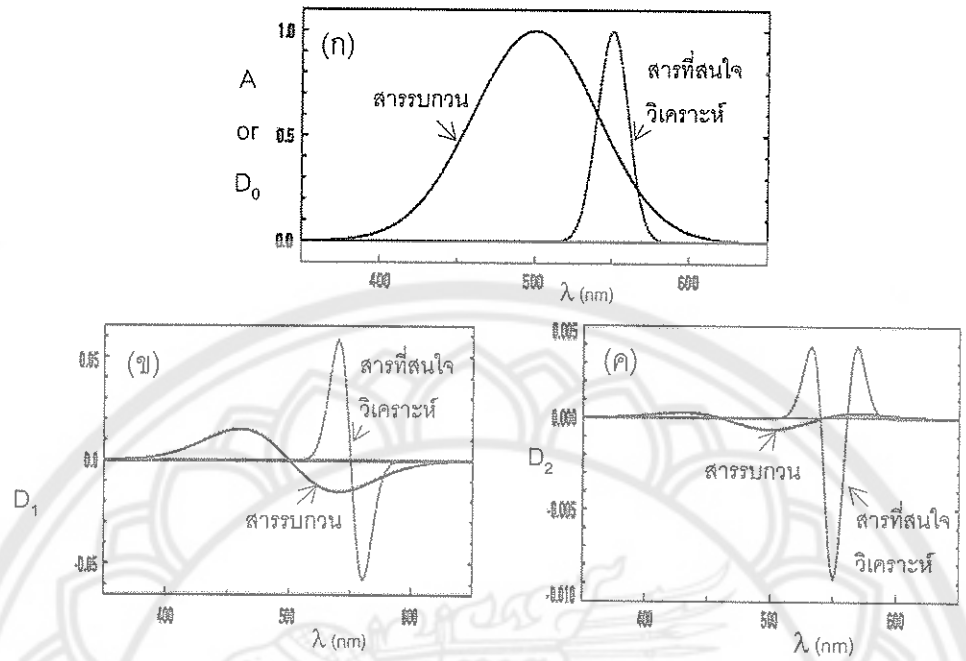
2. สามารถลดหรือกำจัดสัญญาณพื้น (Background elimination) เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณพื้นที่เกิดขึ้นในขณะตรวจวัด ได้แก่ การขยับของสัญญาณพื้น (Baseline shift) การที่แบลงค์มีการดูดกลืนแสงสูง การรบกวนจากเมตริกซ์ (Matrix) และการกระเจิงของแสง (Light scattering) จากความขุ่นของสารละลาย หรือเป็นผลมาจากหลายปัญหารวมกันจนทำให้เกิดการขยับของสัญญาณพื้น ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ (ดังภาพ 9) เช่น ค่า Baseline shift มีค่าเท่ากับ 0.1 Absorbance offset ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ 10% เมื่อทำการวิเคราะห์โดยการใช้แอบซอร์พชันสเปกตรัม แต่เมื่อทำอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (D_1) จะทำให้ค่า Absorbance offset ที่เพิ่มขึ้นอย่างคงที่มีค่าเป็นศูนย์ (อนุพันธ์ของค่าคงที่มีค่าเป็นศูนย์) สเปกตรัมอนุพันธ์ที่ได้จึงไม่ถูกกระทบจาก Baseline shift เช่น ถ้าการรบกวนอธิบายได้ด้วยสมการเชิงเส้น ($P = a\lambda + b$) การทำ D_1 จะทำให้การรบกวนลดลงจนเหลือเป็นค่าคงที่ ($dP/d\lambda = a$) และเมื่อทำ D_2 การรบกวนนั้นจะหมดไป ($dP^2/d\lambda^2 = 0$)



ภาพ 9 การลดหรือกำจัดสัญญาณพื้นของการวิเคราะห์สาร X (ก) แอบซอร์พชันสเปกตรา (เมื่อ a คือสาร X ที่อยู่บน Baseline และ b คือสาร X ที่อยู่ในสารรบกวน และเกิด baseline shift) และ (ข) D_1 สเปกตรัมที่ซ้อนทับกัน (สเปกตรัม a และ b) ของสาร X

ที่มา: Owan, 1995 [14]

3. สามารถเลือกแสดงแถบเด่นที่ถูกบดบังโดยแถบกว้างได้ (Discrimination) เนื่องจากคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่สำคัญมากของสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ คือสามารถทำให้แถบสเปกตรัมที่มีลักษณะกว้าง (เช่น ของเมตริกซ์ หรือสารรบกวน) มีความสูงหรือแอมพลิจูดลดลงได้มากกว่าแถบสเปกตรัมที่แคบกว่า (ซึ่งมักเป็นของสารที่สนใจ) ดังนั้นแถบของสารที่สนใจซึ่งถูกบดบังโดยแถบกว้างอื่นๆ จะปรากฏเด่นชัดขึ้นเมื่อทำอนุพันธ์ ดังภาพ 10 ในขณะที่แถบกว้างกลับมีความสูงลดลงจนไม่รบกวนการวิเคราะห์ คุณสมบัตินี้เป็นผลมาจากแอมพลิจูดของสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับ n (D_n) แปรผกผันกับความกว้าง (W) ของแถบก่อนทำอนุพันธ์ยกกำลัง n ดังนั้นในกรณีที่มีแถบสองแถบที่มีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่มีความกว้างไม่เท่ากัน แอมพลิจูดของอนุพันธ์แถบแคบ (X) จะมีค่ามากกว่า (สูงกว่า) ของอนุพันธ์แถบกว้าง (Y) เป็น $(W_Y/W_X)^n$ เท่า ความแตกต่างของแอมพลิจูดระหว่างสองแถบนี้ยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่ออันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบชนิดหนึ่งซึ่งให้แถบที่แคบชัน ซึ่งอยู่ปนกันกับองค์ประกอบอื่นๆ ที่ให้แถบกว้างสามารถทำได้โดยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ด้วยความจำเพาะและความไวสูง



ภาพ 10 สเปกตรัมของสารที่สนใจวิเคราะห์ (แถบแคบ) ที่ถูกบดบังโดยสเปกตรัมของเมตริกซ์ หรือ สารรบกวน (แถบกว้าง) (ก) แอบซอร์พชันสเปกตรา (ข) D_1 สเปกตรัม และ (ค) D_2 สเปกตรัม

ที่มา: Owan, 1995 [14]

4. สามารถลดอัตราส่วนระหว่างสัญญาณวัดต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio หรือ SNR reduction) เนื่องจากข้อเสียของวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ คือทำให้ค่า SNR ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออันดับของอนุพันธ์สูงขึ้น อย่างเช่นถ้ากรณีแถบของสัญญาณรบกวนมีลักษณะเป็นแถบแคบและชัน ดังนั้นเมื่อทำอนุพันธ์แล้ว สเปกตรัมที่ได้ของสัญญาณรบกวนจึงมีแอมพลิจูดเด่นชัดมากยิ่งขึ้นจนรบกวนการวิเคราะห์ได้ในที่สุด ปัจจุบันนี้จึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญที่สุดในการทำอนุพันธ์อันดับที่สูงๆ

3. การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์

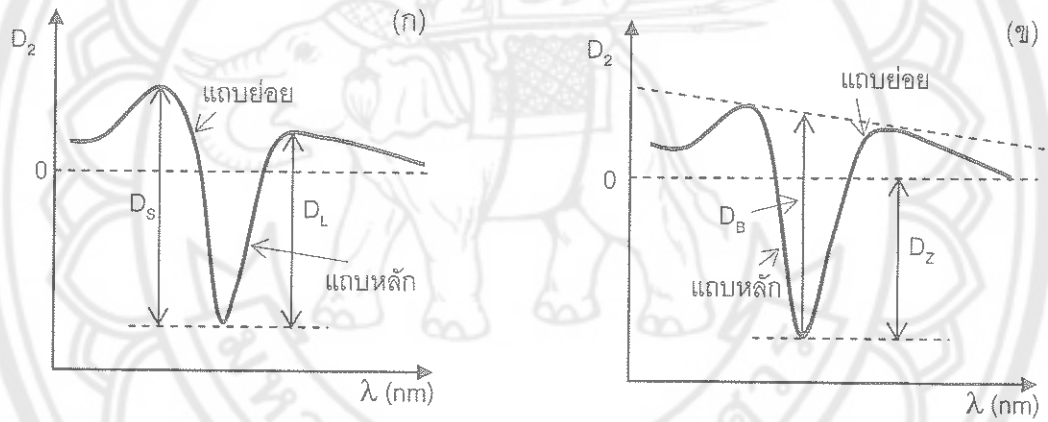
ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์เชิงปริมาณ [12] ทำโดยนำค่าอนุพันธ์ของสารละลายมาตรฐานจากสเปกตรัมอนุพันธ์อันดับที่เลือก (D_n) ไปสร้างกราฟมาตรฐานที่มีความเป็นเส้นตรงจากสมการ (7) ซึ่งหลักการเลือกสเปกตรัมอนุพันธ์ที่เหมาะสมนั้น สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการแยกสัญญาณของสารรบกวน เช่น เทคนิคซีโร-ครอสซิง (Zero-crossing) เป็นต้น

สำหรับการวัดความสูงของพีคของสเปกตรัมอนุพันธ์มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์เชิงปริมาณ ด้วยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีเชิงอนุพันธ์ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. วิธี Band-band หรือ Peak-peak ทำโดยวัดความสูงของแถบย่อย (Satellite band) เช่นด้าน Short-wavelength (D_S) หรือ Long-wavelength (D_L) เทียบกับยอดของแถบหลัก ดังภาพ 11 (ก)

2. วิธี Band-tangent หรือ Peak-tangent ทำโดยลากเส้นสัมผัสยอดของแถบย่อยทั้งสองข้างแล้ววัดระยะจากยอดของแถบหลักถึงเส้นสัมผัสนั้น (D_B) ดังภาพ 11 (ข)

3. วิธี Band-baseline หรือ Peak-baseline หรือ Peak-zero ทำโดยวัดระยะจากยอดของแถบหลักถึงแกน x (เมื่อ y = 0) (D_Z) ดังภาพ 11 (ข)



ภาพ 11 วิธีวัดความสูงของพีคแบบต่าง ๆ จากสเปกตรัมของอนุพันธ์อันดับ 2 เมื่อ (ก) วิธี Band-band และ (ข) วิธี Band-tangent และวิธี Band-baseline

ที่มา: ธีรศักดิ์ โรจนราธา และ วนิดา คำพา, 2550 [12]

4. วิธี Zero-crossing เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ของผสมที่ประกอบด้วยสารสองชนิด (Binary mixture) ไปพร้อมกันโดยการเลือกวัดความสูงของสเปกตรัมของสารชนิดที่หนึ่ง ณ ความยาวคลื่นที่เส้นสเปกตรัมของสารชนิดที่สองผ่านศูนย์หรือใกล้ศูนย์หรือมีค่าคงที่ เพื่อลดหรือตัดสัญญาณรบกวนของสารที่หนึ่ง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาปริมาณวัตถุเจือปนอาหาร คือ เอซีซัลเฟม-เค กรดเบนโซอิก กรดซอร์บิก หรือคาเฟอีน นั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น โครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High performance liquid chromatography หรือ HPLC) [15-34] แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography หรือ GC) [35-39] คาปิลลารีอิเล็กโทรโฟริซิส (Capillary electrophoresis หรือ CE) [40-45] ไอออน โครมาโทกราฟี (Ion chromatography หรือ IC) [46] ฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Furier transform infrared spectroscopy หรือ FTIR) [47] ไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry) [48-49] โฟลอินเจ็คชันอะนาลิซีส (Flow injection analysis หรือ FIA) [50] และอัลตร้าไวโอเลตสเปกโทรโฟโตเมตรี (Ultraviolet spectrophotometry หรือ UV) [51-68] เป็นต้น ซึ่งใช้วิเคราะห์ในตัวอย่างที่หลากหลาย อาทิเช่น เครื่องดื่มน้ำอัดลม สุรา ไวน์ น้ำผลไม้ ยา และอาหาร โดยที่แต่ละวิธีมีเทคนิคในการเตรียมตัวอย่างที่แตกต่างกัน เช่นการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Liquid liquid extraction หรือ LLE) และการสกัดด้วยเฟสของแข็ง (Solid phase extraction หรือ SPE) เป็นต้น

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีอัลตร้าไวโอเลตสเปกโทรโฟโตเมตรีนั้น เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการวิเคราะห์หาปริมาณวัตถุเจือปนอาหารดังกล่าว เพราะเป็นวิธีที่มีความสะดวก ง่าย รวดเร็ว และไม่สิ้นเปลือง โดยมีเทคนิคการแยกสัญญาณของสารรบกวนที่แตกต่างกัน เช่นเทคนิค พีซีอาร์ (Principal component regression หรือ PCR) พีแอลเอส (Partial least squares regression หรือ PLS) เดอริเวทีฟ ซีโร-ครอสซิง สเปกโทรโฟโตเมตรี (Derivative Zero-crossing Spectrophotometry หรือ DZS) เดอริเวทีฟ ซีโร-ครอสซิง สเปกโทรโฟโตเมตรีร่วมกับอัตราส่วนของสเปกตรัม (DZS with Ratio spectra) เป็นต้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์วัตถุเจือปนอาหารด้วยวิธีอัลตร้าไวโอเลตสเปกโทรโฟโตเมตรีร่วมกับเทคนิคการแยกสัญญาณรบกวนต่างๆ ดังกล่าว แสดงรายละเอียดดังตาราง 1

ตาราง 1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของการวิเคราะห์หาปริมาณวัตถุเจือปนอาหาร โดยใช้วิธีอัลตร้าไวโอเลตสเปกโทรโฟโตเมตรีร่วมกับเทคนิคการแยกสัญญาณรบกวนแบบต่างๆ

วิธีวิเคราะห์/เทคนิคการแยกสัญญาณรบกวน	รายละเอียด	ปี [อ้างอิง]
UV/PLS-2	สารที่สนใจวิเคราะห์ : แอสพาร์เทม และเอซีซัลเฟม-เค ตัวอย่าง : น้ำตาลเทียม การเตรียมตัวอย่าง : เจือจางด้วยน้ำ ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรงสำหรับ PLS-2 matrix 0-0.008 และ 0-0.004 g/L และค่า LOD คือ 0.29 และ 0.11 µg/mL สำหรับแอสพาร์เทม และเอซีซัลเฟม-เค ตามลำดับ	2009 [51]
UV/PLS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : กรดเบนโซอิก คาเฟอีน แอสพาร์เทม และเอซีซัลเฟม-เค ตัวอย่าง : เครื่องดื่มโคล่า การเตรียมตัวอย่าง : เจือจางด้วยน้ำ ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 3-5, 3-5, 5-7 และ 3-5 µg/mL สำหรับกรดเบนโซอิก คาเฟอีน แอสพาร์เทม และเอซีซัลเฟม-เค ตามลำดับ	2009 [52]
UV/PCR	สารที่สนใจวิเคราะห์ : กรดเบนโซอิก เมทิลพาราเบน โพรพิลพาราเบน และกรดซอร์บิก ตัวอย่าง : อาหาร การเตรียมตัวอย่าง : สกัดด้วยตัวทำละลาย ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 0.5-20, 0.5-20, 0.5-20 และ 0.25-10 mg/L และค่า LOD คือ 0.22, 0.19, 0.17 และ 0.08 mg/L สำหรับกรดเบนโซอิก เมทิลพาราเบน โพรพิลพาราเบน และกรดซอร์บิก ตามลำดับ	2009 [53]

ตาราง 1 (ต่อ)

วิธีวิเคราะห์/เทคนิค การแยกสัญญาณ รบกวน	รายละเอียด	ปี [อ้างอิง]
UV/PLS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : ซัคคาริน และเอซีซัลเฟม-เค ตัวอย่าง : น้ำตาลเทียม ผงกลิ่นผลไม้ การเตรียมตัวอย่าง : เจือจางด้วยน้ำ ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 2-15 และ 2-20 mg/L และค่า LOD คือ 0.312 และ 0.085 mg/L สำหรับซัคคาริน และเอซีซัลเฟม-เค ตามลำดับ	2008 [54]
UV/PLS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : พาราเซตามอล ไอบูโพรเฟน และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ตำรับยา การเตรียมตัวอย่าง : สกัดด้วย เมทานอลต่อ 0.1 mol/L HCl (3:1) ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 0.6-11, 1-24 และ 1-18 µg/mL และค่า LOD คือ 0.21, 0.52 และ 0.67 µg/mL สำหรับพาราเซตามอล ไอบูโพรเฟน และคาเฟอีน ตามลำดับ	2008 [55]
UV/PLS-2	สารที่สนใจวิเคราะห์ : กรดซอร์บิก และกรดเบนโซอิก ตัวอย่าง : น้ำผลไม้ การเตรียมตัวอย่าง : เจือจางด้วยน้ำ ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรงสำหรับ PLS-2 matrix คือ 0-0.01 และ 0-0.01 g/L สำหรับกรดซอร์บิก และกรดเบนโซอิก ตามลำดับ	2007 [56]
UV/PLS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : พาราเซตามอล อะซิทิลซาลิไซลิก และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ตำรับยา การเตรียมตัวอย่าง : ละลายด้วย 20% เอทานอล ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : พบความเข้มข้นของพาราเซตามอล อะซิทิลซาลิไซลิก และคาเฟอีน อยู่ในช่วง 13.5-33, 18-38.5 และ 2.7-5.5 mg ตามลำดับ	1997 [57]

ตาราง 1 (ต่อ)

วิธีวิเคราะห์/เทคนิคการแยกสัญญาณรบกวน	รายละเอียด	ปี [อ้างอิง]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : คาเฟอีน ตัวอย่าง : ยาแก้ปวดชนิดบรรจุซอง สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับซีโร-ครอสซิง ที่ 258 nm ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 0-30 µg/mL ค่า %RSD(n=7) อยู่ในช่วง 1.57-2.36 และค่า %Rec อยู่ในช่วง 98.5-100.2	2534 [58]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : พาราเซตามอล โพรพิฟีนาโซน และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ตำรับยา สภาวะการทดลอง : D_1-D_4 ร่วมกับซีโร-ครอสซิง ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 0-30, 0-30 และ 0-4.5 µg/mL สำหรับพาราเซตามอล โพรพิฟีนาโซน และคาเฟอีน ตามลำดับ	2009 [59]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : กรดอะซิทิลซาลิไซลิก และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ตำรับยา สภาวะการทดลอง : D_1 ฟลูออเรสเซนต์สเปกตรัมร่วมกับซีโร-ครอสซิง ที่ 316 nm (กรดอะซิทิลซาลิไซลิก) และ 288 nm (คาเฟอีน) ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 0.021-41.62 และ 0.4486-44.86 µg/mL ค่า %Rec คือ 98.4-102 และ 90-100.5 และค่า LOD คือ 0.0013 และ 0.0306 µg/mL และค่า %RSD คือ 2.75 และ 1.7 สำหรับกรดอะซิทิลซาลิไซลิก และคาเฟอีน ตามลำดับ	2006 [60]

ตาราง 1 (ต่อ)

วิธีวิเคราะห์/เทคนิคการแยกสัญญาณรบกวน	รายละเอียด	ปี [อ้างอิง]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : ฟีนิโทอิน บาร์บิทัล และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ตำรับยา สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 0.24-22, 0.01-27 และ 0.049-27 µg/mL ค่า %Rec อยู่ในช่วง 94.89-100.57, 99.0-106.87 และ 100.08-110.60 ค่า LOD คือ 0.06, 0.06 และ 0.04 µg/mL และค่า LOQ คือ 0.08, 0.07 และ 0.06 µg/mL สำหรับฟีนิโทอิน บาร์บิทัล และคาเฟอีน ตามลำดับ	2005 [61]
UV/DZS with Ratio spectrum	สารที่สนใจวิเคราะห์ : พาราเซตามอล กรดอะซิทิลซาลิไซลิก และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ยาเม็ด สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง/Ratio spectrum ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 5-25, 5-25 และ 4-28 µg/mL สำหรับพาราเซตามอล อะซิทิลซาลิไซลิก และคาเฟอีน ตามลำดับ	2005 [62]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : คาเฟอีน ตัวอย่าง : เครื่องดื่ม สภาวะการทดลอง : D_3 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 2.0-10 µg/mL และค่า MDL คือ 2 µg/mL	2002 [63]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : คาเฟอีน อะซีทามิโนเฟน และโพรพิฟีนาโซน ตัวอย่าง : ยาเม็ด สภาวะการทดลอง : D_4 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง ที่ 230 nm (คาเฟอีน) 263.2 nm (อะซีทามิโนเฟน) และ 256.6 nm (โพรพิฟีนาโซน) ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง 1-5, 5-25, และ 5-25 µg/mL สำหรับคาเฟอีน อะซีทามิโนเฟน และโพรพิฟีนาโซน ตาม ลำดับ	2002 [64]

ป
TX
501
ป457ก
2552

สำนักหอสมุด
2 - S.A. 2552
ม.ล.ช.10752

ตาราง 1 (ต่อ)

วิธีวิเคราะห์/เทคนิคการแยกสัญญาณรบกวน	รายละเอียด	ปี [อ้างอิง]
UV/DZS with Ratio spectrum	สารที่สนใจวิเคราะห์ : คาเฟอีน และพาราเซตามอล ตัวอย่าง : ยาเม็ด สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง/Ratio spectrum ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 4-40 และ 8-48 µg/mL ค่า %Rec คือ 99.5 และ 100.8 และค่า %RSD คือ 0.82 และ 0.89 สำหรับคาเฟอีน และพาราเซตามอล ตามลำดับ	2002 [65]
UV/DZS with Ratio spectrum	สารที่สนใจวิเคราะห์ : เมทามิซอล พาราเซตามอล และคาเฟอีน ตัวอย่าง : ยาเม็ด สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง/Ratio spectrum ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง 12-56, 8-40 และ 4-48 µg/mL ค่า %Rec คือ 99.5, 100.1 และ 99.4 และค่า %RSD คือ 0.87, 1.03 และ 1.03 สำหรับเมทามิซอล พาราเซตามอล และคาเฟอีน ตามลำดับ	2002 [66]
UV/DZS with Ratio spectrum	สารที่สนใจวิเคราะห์ : อะซีทัลซาลิไซลิก คาเฟอีน และโคเดอีน ตัวอย่าง : ตำรับยา สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิง/Ratio spectrum ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง 12-22, 0.4-2 และ 0.2-1 µg/mL สำหรับอะซีทัลซาลิไซลิก คาเฟอีน และโคเดอีน ตามลำดับ	2002 [67]
UV/DZS	สารที่สนใจวิเคราะห์ : คาเฟอีน ตัวอย่าง : อาหาร ตำรับยา สภาวะการทดลอง : D_1 ร่วมกับเทคนิคซีโร-ครอสซิงที่ 273 nm ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ : ช่วงความเป็นเส้นตรง คือ 4-40 µg/mL และค่า %Rec อยู่ในช่วง 99.92-100.35	2002 [68]