

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความหมายของแก้ว [1, 2]

ตามพจนานุกรม WEBSTER'S INTERNATIONAL กล่าวไว้ว่า แก้ว คือ วัตถุที่อยู่ในรูปของ AMORPHOUS ที่มีคุณสมบัติโปร่งใสและประกอบขึ้นจากซิลิกาเกต บอเรต ฟอสเฟต และอื่นๆ

TAYLOR W.C. กล่าวว่า แก้ว คือ ของเหลวที่มีความเร็วด้วยควยิ่ง (SUPER-COOLER LIQUID) ซึ่งมีส่วนประกอบเปลี่ยนแปลงได้ ตั้งแต่ออกไซด์ของซิลิกาเพียงอย่างเดียว ไปจนถึงการผสมออกไซด์ของธาตุอื่นๆกับออกไซด์ของซิลิกา

ความหมายของคำว่า แก้ว ในทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งได้คิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1945 โดย THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM) กล่าวว่า แก้ว คือ การนำวัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆมาเผาให้ถึงจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง แล้วเกิดการเย็นตัวกลายเป็นของแข็งอย่างรวดเร็วโดยปราศจากการตกผลึก

แก้ว คือ วัสดุเซรามิกที่ถูกทำขึ้นจากสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูง แก้วแตกต่างจากวัสดุเซรามิกอื่นๆ คือ เมื่อองค์ประกอบถูกหลอมเหลวโดยให้ความร้อนและทำให้เย็นตัวลงแล้ว แก้วจะแข็งตัวโดยไม่เกิดโครงสร้างผลึก ดังนั้นแก้วจึงเป็นวัสดุที่ไม่มีผลึก หรืออสัณฐาน โมเลกุลของแก้วจะไม่มี การเย็นตัวอย่างเป็นระเบียบ

### 2.2 ประวัติความเป็นมาของแก้ว [3, 4]

มีการสันนิษฐานว่า แก้วถูกพบเป็นครั้งแรกเมื่อประมาณ 77,000 ปีมาแล้ว โคนมนุุษย์สมัย โบราณได้พบชิ้นแก้วที่เกิดจากภูเขาไฟละลาย และได้นำมาใช้เป็นเครื่องมือ ต่อมามนุษย์จึงรู้จักทำ แก้วขึ้นมาได้เป็นครั้งแรกในแถบตะวันออกกลาง (Middle East) เมื่อประมาณ 4,000 ปีมาแล้ว โดยชาวอียิปต์และชาวซีเรียได้ทำลูกปัดแก้ว (Glass Beads) เครื่องประดับอภรณ์ (Ornaments) และขวดเล็กๆมาใช้สอยได้

ชาวโรมันได้นำช่างทำแก้วจากอียิปต์ไปยังอิตาลี เมื่อประมาณ 100 ปีก่อนคริสตกาล ต่อมาในราวปี ค.ศ. 500 จึงมีการประดิษฐ์คิดค้น หลอดเป่าแก้ว (Blow Tube) หลักการในการทำแก้วอย่างหนึ่งได้แก่ การที่แก้วสามารถทำให้กลวง และเป็นรูปร่างบางอย่างได้โดยอาศัยการเป่า และศิลปะการทำแก้วโดยการเป่าก็ยังคงมีการใช้อยู่จนปัจจุบัน ต่อมาหลังจากอารยธรรมของอาณาจักรโรมันได้เสื่อมถอยลงแล้ว การทำแก้วหลายแห่งในยุโรปก็สลายตัวตามไปด้วย

ในระหว่างสมัยกลางของประวัติศาสตร์ (Middle Ages) แก้วได้นำมาใช้ตกแต่งประดับประดาตามโบสถ์ต่างๆ โดยทำเป็นโมเสกส์ (Mosaics) และแก้วสี (Stained Glass) นำมาปะติดรวมกันเป็นรูปภาพต่างๆตามเรื่องราวจากคัมภีร์ศาสนา นอกจากนี้จะให้ความสวยงามแล้ว ยังนับเป็นประโยชน์สำหรับคนที่อ่านหนังสือไม่ออก ให้สามารถรับรู้เรื่องราวของคัมภีร์จากภาพเหล่านั้นได้ สมัยนั้นแก้วชนิดที่ดีที่สุดที่ใช้ในการประดับหน้าต่างโบสถ์ เป็นแก้วที่ทำจากนอร์มันดี และลอรเรน (Normandy and Lorraine) แหล่งศูนย์กลางของการทำแก้วค่อยๆเคลื่อนย้ายมาอยู่ที่กรุงเวนิซเป็นลำดับ เป็นเวลานับศตวรรษๆที่ชาวเวนิซได้พัฒนาแบบการตกแต่งประดับประดาแก้วเป็นเอกลักษณ์ของตนเองโดยเฉพาะ มีการใช้แก้วสีใหม่ๆและแก้วกระจกเงา (Mirror) แก้วของชาวเวนิซเป็นที่ยอมรับนับถือว่าเป็นแก้วชนิดดีและสวยงามที่สุดในโลกติดต่อกันมาเป็นเวลา 300 ถึง 400 ปีทีเดียวจนถึงปลายศตวรรษที่ 17

ความลับและฝีมือในการทำแก้วของชาวเวนิซได้แพร่เข้าสู่ยุโรปตอนเหนือ และในศตวรรษที่ 17 นี้เอง โบฮีเมีย (Bohemia) ฝรั่งเศส อังกฤษ และเนเธอร์แลนด์ก็สามารถผลิตแก้วที่สวยงาม ออกมามากขึ้น ฝรั่งเศสได้พัฒนาการทำแก้วแผ่นเรียบ plate glass อังกฤษค้นพบวิธีการทำแก้วเทียมผสมตะกั่ว (lead glass) ซึ่งเป็นการเริ่มต้นไปสู่ยุคของการเจียรระโน การเกาะลวดลายลงบนแก้วเจียรระโน (Crystal) ตลอดจนการทำก้านแก้วทึบแสงบิดเกลียว (Opaque and Air Twist Stemmed Glass) และพัฒนาต่อมาในศตวรรษที่ 18 อังกฤษนับว่ามีชื่อเสียงมากในการผลิตแก้ว เช่นที่ว่ามานี้

ในปลายศตวรรษที่ 19 เครื่องจักรชุดแรกที่ใช้ในการทำแก้ว ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้น นับเป็นการปฏิรูปการทำแก้วขึ้นอีกขั้นหนึ่ง หลังจากที่ได้มีการปฏิรูปขั้นแรกด้วยการค้นพบหลอดเป่าแก้ว (Blowing Pipe) มาแล้วครั้งหนึ่ง ในศตวรรษที่ 20 เราก็ได้เครื่องจักรอัดโนมัตในการผลิตขวดแก้ว การผลิตแก้วแผ่นเรียบแบบ Plate Glass และ Sheet Glass การผลิตแก้วแผ่นเรียบแบบ float glass ตลอดจนความก้าวหน้าของการผลิตแก้วไฟเบอร์ (Glass Fibers) และคุณสมบัติของแก้วเหล่านี้ ในขณะที่เดียวกันบรรดานักออกแบบชาติต่างๆก็ได้คิดประดิษฐ์กรรมใหม่ๆ ทำให้แก้วที่ผลิตออกมาใช้ มีศิลปะงดงามยิ่งขึ้น

นอกจากนี้แก้วถูกพัฒนาโดยใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบหลักและกระบวนการในการทำแก้ว ในการผลิตแก้วเพื่อใช้งานจะแบ่งได้ 2 ด้านใหญ่ๆ ระหว่างการผลิตแก้วหัตถกรรมสำหรับงานศิลปะ กับอุตสาหกรรมการผลิตแก้วที่ใช้เพื่อประโยชน์อื่นๆ โดยในที่นี้เราจะให้ความสำคัญกับการการผลิตแก้วในด้านอุตสาหกรรม ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้ทดแทนหัตถกรรมแก้วในบางส่วน โดยการนำเครื่องจักรเข้ามาใช้แทนการทำด้วยมือ ซึ่งเกิดขึ้นในต้นศตวรรษปัจจุบันนี้ ส่งผลให้มีการให้ความสนใจในด้านอุตสาหกรรมมากกว่ากระบวนการทางวิทยาศาสตร์ แก้วที่ผลิตด้วยมือจะต้องใช้ประสบการณ์ในการกำหนดสถานะในการผลิตให้มีความเหมาะสม ซึ่งไม่มีความจำเป็นสำหรับเครื่องจักร อุตสาหกรรมแก้วมีการพัฒนาต่อเนื่องไปโดยความรู้ทางด้านวิศวกรรม และประสบการณ์ที่ขอกเล่าต่อกันถึงกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ของแก้ว การพัฒนานี้ขยายในเวลาเพียงไม่กี่ปีโดยอาศัยวิทยาศาสตร์กายภาพ ประสบการณ์ด้านเทคนิค และคอมพิวเตอร์

เริ่มจากการวิจัยที่มีขอบเขตกว้างขวางบนความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของแก้ว และส่วนประกอบ ในช่วงหลังของศตวรรษที่ 19 Ernst Abbe และ Otto Schott เป็นผู้ริเริ่มพัฒนาโดยมีความต้องการแก้วชนิดใหม่และดีขึ้นเพื่อนำไปใช้ทางด้านทัศนศาสตร์ Thermometer และความต้องการผลิตที่มีความทนทานต่อสารเคมีสูงและความทนทานต่ออุณหภูมิ ซึ่งถูกบอกเล่าโดย Hovestad (1902) การวิจัยของทั้งสองคนเหมือนกับแบบจำลองที่มีการศึกษาในภายหลัง ซึ่งมีการเปิดเผยถึงความหลากหลายในการใช้งานของแก้ว เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตต้องการประสิทธิภาพในการควบคุมการทำงานอย่างต่อเนื่องสำหรับส่วนประกอบของแก้ว คุณสมบัติ และอุณหภูมิในระดับที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ของแก้วที่มีความแตกต่างกัน

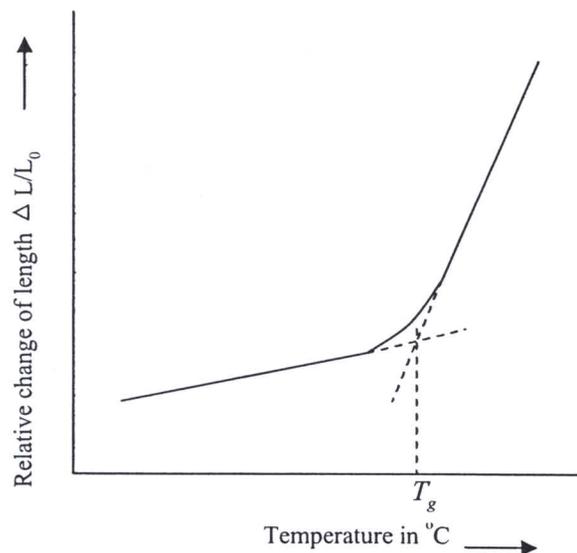
### 2.3 การเกิดแก้ว (Glass Formation) และจุดของการอบแก้ว (Annealing Point) [5, 6]

แก้วเกิดจาก การเย็นตัวของของเหลวอย่างรวดเร็วผ่านสภาพของ Supercooled Liquid เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จะอยู่ในสภาพแก้ว (Glassy State) โดยไม่เกิดผลึก ซึ่งในการพิจารณาการเกิดแก้วนั้น สามารถติดตามได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 2.1



State) เป็นผลทำให้สมบัติด้านต่างๆ ของแก้วคงที่ ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้เป็นช่วงที่ใช้ในกระบวนการอบแก้ว (Annealing Process)

อุณหภูมิที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากในการศึกษาเรื่องแก้วคือ อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟระหว่างปริมาตรและอุณหภูมิ แต่ในความเป็นจริงแล้ว การปรากฏค่า  $T_g$  ที่ชัดเจนเกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของแก้วและอุณหภูมิในช่วงการเปลี่ยนแปลงจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวของแก้วกับอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความยาวของแก้วกับอุณหภูมิ [6]

จากกราฟ เห็นได้ว่า ช่วงที่แก้วมีอุณหภูมิต่ำ (สภาพแก้วเหลว) และอุณหภูมิต่ำ (สภาพแก้วแข็ง) เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรง แต่ช่วงอุณหภูมิตั้งกลาง การเปลี่ยนแปลงความยาวจะเป็นเส้นโค้ง ดังนั้น ในการหาค่า  $T_g$  ทำได้โดยต่อแนวเส้นตรง (Extrapolate) จากเส้นกราฟในสภาพแก้วเหลวและสภาพแก้วแข็งสัมผัส (Tangential) กับส่วนโค้งของกราฟ จุดตัดของเส้นตรงที่เกิดขึ้นจะได้ค่า  $T_g$  ของแก้วชนิดนั้น ในทางปฏิบัติ ช่วงการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในช่วงของ  $T_g \pm 30^\circ\text{C}$  ถึง  $T_g \pm 50^\circ\text{C}$  ซึ่งช่วงดังกล่าวนี้ จะเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแก้วนั่นเอง

เมื่อก้าวถึงจุดอบแก้ว (Annealing Point) เป็นจุดที่ทำให้ความเครียดภายใน (Internal Stress) ของแก้วลดลงหรือหมดไป หรือกล่าวได้ว่า ณ จุดอบแก้วนี้ แก้วมีความหนืด  $10 \text{ N.s/m}^2$

ทั้งนี้ จุดอบแก้วจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของแก้ว, องค์ประกอบในแก้วและอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว เป็นต้น

## 2.4 หลักในการเกิดแก้ว

แก้วถูกทำขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการแทนแก้วที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งปรากฏตามพื้นผิวโลกค้นพบในปริมาณน้อย ไม่เพียงพอกับความต้องการใช้แก้วที่มีในปริมาณมาก เครื่องมือเครื่องใช้สอยที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จึงเป็นแก้วที่ถูกผลิตขึ้นมาทั้งสิ้น

การทำแก้วขั้นพื้นฐานเป็นการนำทรายซิลิกา (Silica Sand) มาเผาให้ร้อนจนหลอมละลายเป็นของเหลว ทรายเมื่อหลอมละลายแล้วจะมีลักษณะจับตัวหนาและเหนียว เมื่อทิ้งให้เย็นตัวลงทั้งความหนาและความเหนียวก็จะเพิ่มขึ้น แล้วจะแข็งตัวเป็นแก้ว

ซิลิกาต้องการความร้อนสูงมากจึงจะถึงจุดหลอมเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใส่ส่วนประกอบ (Ingredients) บางอย่างลงไปผสมกับทรายด้วย เพื่อช่วยให้ทรายหลอมละลายได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ส่วนผสมบางชนิดยังถูกใส่เข้าไปเพื่อทำให้แก้วมีสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำแก้วนั้นๆ ไปใช้งาน หรืออาจผสมสารที่ให้สี (Coloring Agents) ลงไปผสมก่อนที่ส่วนประกอบต่างๆ จะหลอมละลาย

เมื่อส่วนประกอบต่างๆ ถูกผสมได้ตามสัดส่วนที่ถูกต้องแล้วนำมาใส่ในเตาหลอม (Furnace) แล้วแก้วที่อยู่ในเตาจะหลอมละลาย พร้อมทั้งจะนำไปทำให้เป็นรูปร่างต่างๆต่อไป หลังจากได้แก้วเป็นรูปตามต้องการแล้ว จะต้องปล่อยให้เย็นลงอย่างช้าๆ เพื่อให้มีความแข็งแรงและความเหนียว กรรมวิธีนี้นับเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากอันหนึ่งของการทำแก้ว แก้วบางชนิดก็ต้องการตกแต่งหรือขัดเงาอีกครั้ง เพื่อให้ได้ผิวสัมผัสที่เรียบ

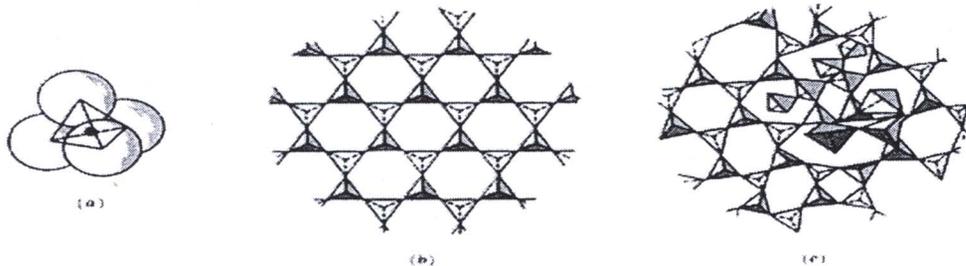
## 2.5 โครงสร้างของแก้ว [2, 11]

โครงสร้างของแก้วอาจแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามชนิดของแก้วดังนี้คือ

### 2.5.1 Glass-Forming Oxide

แก้วที่ทำมาจากสารอินทรีย์ส่วนใหญ่มักจะเป็นซิลิกา ( $SiO_2$ ) หน่วยย่อยพื้นฐานของแก้วซิลิกา คือ  $SiO_4^{4-}$  ซึ่งมีไอออนของซิลิกอน ( $Si^{4+}$ ) อยู่ตรงกลางของรูปทรง Tetrahedron เกิดพันธะโคเวเลนต์ไอออนิกกับไอออนของออกซิเจนอีก 4 ไอออน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (a) โดยปกติโครงสร้างผลึกของซิลิกา เช่น Cristobalite ซึ่ง  $Si-O$  Tetrahedra จะเกิดพันธะต่อกันอย่างมีระเบียบ

ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (b) แต่สำหรับแก้วซิลิกาแล้ว  $Si-O$  Tetrahedra จะเกิดพันธะเป็นโครงสร้างโครงข่ายอย่างหลวมๆ และไม่เป็นระเบียบ ดังรูปที่ 2.3 (c) โบรอนออกไซด์ ( $B_2O_3$ ) ก็มีโครงสร้างเป็น Glass-Forming Oxide เช่นกัน กล่าวคือ โบรอนออกไซด์จะประกอบด้วยหน่วยย่อยของระนาบ Triangles โดยที่อะตอมของโบรอนขยับออกจากระนาบของอะตอมออกซิเจนเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามภายในโครงสร้างของแก้ว Borosilicate ที่มีการเติมออกไซด์ของธาตุแอลคาไล หรือ แอลคาไลน์เอิร์ท  $BO_3^-$  Triangle สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้เป็น  $BO_4^-$  Tetrahedra โดยที่แคตไอออนของแอลคาไลหรือแอลคาไลน์เอิร์ททำหน้าที่ที่จะต้องทำหน้าที่ในการรักษาประจุของโครงสร้างให้เป็นกลาง โบรอนออกไซด์เป็นสารที่สำคัญที่มักถูกเติมลงในแก้วหลายชนิด เช่น แก้ว Borosilicate และ Aluminoborosilicate  $BO_4^-$



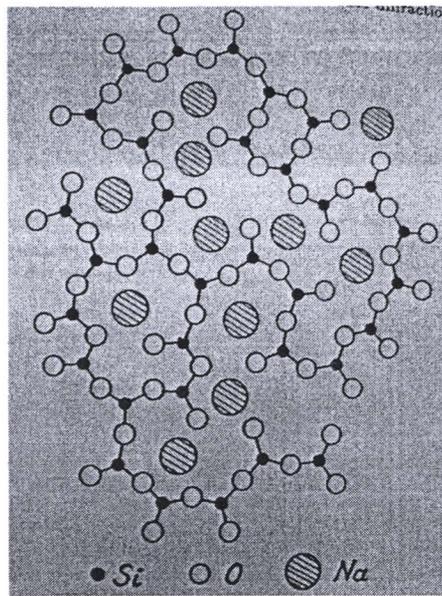
รูปที่ 2.3 แสดงภาพจำลอง (a) Silicon-Oxygen Tetrahedron  
(b) โครงผลึกของซิลิกา (Cristobalite) (c) โครงผลึกของแก้ว [2]

### 2.5.2. Glass-Modifying Oxide

เมื่อเติมสารบางอย่างลงในแก้ว จะทำให้โครงสร้างโครงข่ายของแก้วบางส่วนถูกทำลาย เราเรียกโครงสร้างนี้ว่า Network Modifier เช่น แอลคาไลออกไซด์ เช่น  $Na_2O$  และ  $K_2O$  และ แอลคาไลน์เอิร์ทออกไซด์ เช่น  $CaO$  และ  $MgO$  เป็นต้น เมื่อโครงสร้างโครงข่ายบางส่วนของแก้วแตกออก ดังแสดงในรูป 2.4 (a) จะทำให้ความหนืดของแก้วลดลง และสามารถนำไปขึ้นรูปได้ง่าย อะตอมของออกซิเจนจากออกไซด์เหล่านี้จะเข้าสู่โครงสร้างโครงข่ายของซิลิกาที่จุดเชื่อมต่อระหว่าง Tetrahedra และทำลายโครงสร้างโครงข่ายนั้น ทำให้เกิดอะตอมของออกซิเจนที่มีอิเล็กตรอนไม่มีคู่ขึ้น ดังรูปที่ 2.4 (a) ส่วนไอออนของ  $Na^+$  และ  $K^+$  จาก  $Na_2O$  และ  $K_2O$  จะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างโครงข่ายนี้ได้ แต่จะยังคงอยู่ในรูปของไอออนและเกิดพันธะไอออนิกภายในช่องของโครงสร้างโครงข่ายนั้น ไอออนเหล่านี้จะส่งเสริมให้แก้วเกิดผลึกภายในโครงสร้างได้

### 2.5.3. Intermediate Oxide ในแก้ว

ออกไซด์ของสารประกอบบางชนิดไม่สามารถเกิดโครงสร้างโครงข่ายของแก้วได้ด้วยตัวเอง แต่สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายที่มีอยู่ ออกไซด์ของสารประกอบเหล่านี้จะถูกเรียกว่า Intermediate Oxides เช่น  $Al_2O_3$  สามารถเข้าไปร่วมกับโครงสร้างโครงข่ายของซิลิกาได้ในรูป  $AlO_4^{4-}$  Tetrahedra แทนกลุ่ม  $SiO_4^{4-}$  บางกลุ่ม ดังรูปที่ 2.4 (b) ทำให้แก้วมีสมบัติพิเศษ เช่น แก้ว Aluminosilicate นี้จะทนต่ออุณหภูมิที่สูงๆ ได้ดีกว่าแก้วธรรมดา ตะกั่วออกไซด์ก็เป็น Intermediate Oxide อีกตัวอย่างที่ถูกเติมลงในแก้วซิลิกาบางชนิดเช่นกัน



รูปที่ 2.4 Network-Modified Glass (Soda-Lime Glass) [11]

## 2.6 ชนิดของแก้ว [5, 8, 9]

อาจจำแนกแก้วออกเป็นชนิดต่างๆได้ตามนี้

### 2.6.1 แก้วทางการค้า เป็นแก้วที่มีการนำมาใช้งานทั่วไป

2.6.1.1 ควอทซ์ (Fused Quartz) เป็นแก้วที่มีเปอร์เซ็นต์ของซิลิกาสูง บางทีเรียกว่าแก้วซิลิกาบริสุทธิ์ เป็นแก้วที่มีความแข็งแรง มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion Coefficient) ต่ำ มีความต้านทานต่อสารเคมีไฟฟ้าสูงแม้ในขณะที่ยังร้อน แก้วชนิดนี้จะโปร่งแสงสำหรับช่วงความยาวคลื่นค่อนข้างกว้างในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic

Spectrum) และโปร่งแสง คือคลื่นเสียงสามารถผ่านทะลุได้ ไม่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลต มีน้ำหนักเบา ข้อเสียคือ แก้วชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวสูง และมีราคาแพง

2.6.1.2 แก้วอ่อนหรือแก้วโซดา (Soft Glass หรือ Soda Glass) หรืออาจเรียกว่าแก้วไลม์ (Lime Glass) การผลิตแก้วชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากพบว่าเมื่อเติมโซดา (อาจอยู่ในรูป  $\text{Na}_2\text{O}$  หรือ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) หรือโปแตส ( $\text{K}_2\text{O}$ ) ลงในซิลิกาจะช่วยทำให้จุดอ่อนตัวของซิลิกาตกลงกว่าเดิม มาอยู่ที่ประมาณ  $800\text{-}900^\circ\text{C}$  แต่ทำให้มีข้อเสียคือแก้วที่ได้ไม่ค่อยทนทานต่อสารเคมี และต่อมาพบว่าการเติมไลม์ หรือปูนดิบ ( $\text{CaO}$ ) หรือแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) หรืออลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) จะช่วยทำให้แก้วมีความทนทานต่อสารเคมีมากขึ้น และยังช่วยให้ผิวแก้วมีความแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ทนทานต่อการขีดขีด มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นสูงมาก ยากต่อการทำแอนนิล

2.6.1.3 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) บางทีเรียกว่าแก้วแข็ง แก้วชนิดนี้มีชื่อทางการค้าว่า ไพเร็กซ์ (Pyrex) หรือ คิมแมกซ์ (Kimax) เป็นแก้วที่มีส่วนผสมของโซดาและโปแตสอยู่เพียงเล็กน้อย ไม่มีไลม์อยู่เลย และจะมีบอรอนออกไซด์ ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) ประมาณ 12% ทำให้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำมาก ทนต่อความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วได้ดี ทนต่อสารเคมีได้ดีมาก

2.6.1.4 แก้วตะกั่ว (Lead Glass) บางครั้งเราเรียกแก้วชนิดนี้ว่า Flint Glass แก้วชนิดนี้จะเติมตะกั่วออกไซด์ ซึ่งทำให้แก้วมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าแก้วโซดา และช่วยให้แก้วมีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) สูงขึ้น มีกำลังในการกระจายแสงสูง (Dispersion Power) สูงขึ้นด้วย แก้วชนิดนี้จัดเป็นแก้วอ่อนชนิดหนึ่ง และมีสมบัติที่ดีคือสามารถงอได้มากกว่าแก้วชนิดอื่นๆ และใช้เชื่อมต่อกับโลหะได้ดี

2.6.1.5 แก้วไวคอร์ (Vycor Glass) ( $\text{SiO}_2$  96%  $\text{B}_2\text{O}_3$  3%) มีชื่ออีกอย่างว่า แก้วซิลิกา 96% แก้วชนิดนี้มีสมบัติที่ดีหลายอย่างคือ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ ทนทานความร้อนและทนทานต่อสารเคมีได้ดี แก้วชนิดนี้มีจุดอ่อนตัวค่อนข้างสูง

2.6.1.6 แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate Glass) ส่วนประกอบสำคัญของแก้วชนิดนี้คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ ประมาณ 60 % เป็นแก้วที่ทนทานต่อสารเคมีและไฟฟ้าได้ดี แม้แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ มีการขยายตัวเชิงเส้นค่อนข้างสูงเมื่อได้รับความร้อน

2.6.1.7 แก้วที่ใช้สำหรับงานแสง (Optical Glass) เป็นแก้วที่ใช้ทำเลนส์หรือทัศนอุปกรณ์ มีหลายชนิด และใช้งานต่างกัน สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือค่าดัชนีหักเห

2.6.2 แก้วพิเศษ (Special Glass) เป็นแก้วที่ทำขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีสมบัติที่ดีตามประสงค์ แก้วพวกนี้จึงมีสมบัติเด่นเฉพาะตัว ตัวอย่างของแก้วพวกนี้ได้แก่

2.6.2.1 แก้วปลอดซิลิกอน (Silicon-Free Glass) เป็นแก้วที่ใช้สำหรับทำหลอดแสงโซเดียม

2.6.2.2 แก้วฟอสเฟต (Phosphate Glass) เป็นแก้วที่ต้านทานต่อกรดกัดแก้ว (ไฮโดรฟลูออริก, HF) ได้ดี

2.6.2.3 แก้วที่มีตะกั่วสูง (High Lead Content Glass) เป็นแก้วที่นำไปใช้ใน งานด้านรังสี เนื่องจากสามารถดูดกลืนรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ได้ดี และนอกจากนี้แก้วชนิดนี้ จัดเป็น Vary Dense Flint Glass ด้วยจึงทำเป็นเลนส์แว่นตาได้

2.6.2.4 Fused silica glass การผลิตแก้วชนิดนี้ใช้วิธี ไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetra chloride) โดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง กระบวนการนี้ ทำให้ได้แก้วที่มีความบริสุทธิ์ของซิลิกาสูง แก้วดิบที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีรูปร่างเป็นแผ่น การผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูงเป็นการกำจัดสารปนเปื้อนที่อยู่ ทำให้ Fused Silica ที่ได้บริสุทธิ์มาก คือจะมี สารปนเปื้อนในระดับเพียง 1 ในล้านส่วนเท่านั้น แก้วชนิดนี้มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ จึงใช้ประโยชน์สำหรับทำเลนส์กล้องโทรทรรศน์

2.6.2.5 High Silica Glass เป็นแก้วที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับ Fused Silica มีสมบัติคล้ายกัน แต่แก้วชนิดนี้มีส่วนผสมของซิลิกาสูงกว่า ทำให้มีสมบัติพิเศษคือไม่แตก ง่าย แม้ว่าจะเผาแก้วนี้จนร้อนแดงแล้วจุ่มลงในน้ำที่มีน้ำแข็งอยู่ด้วยในทันที ทนต่อสารเคมีได้ดีกว่า แก้วชนิดอื่น

2.6.2.6 Glass – Ceramic หรือ Pyrocerum เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการ ผลิตแก้วแล้วเปลี่ยนเป็นเซรามิก ประเภทผลึก ผลึกที่เกิดเป็นผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าและแบบเดียวกัน มากกว่าเซรามิกทั่วไป มีสมบัติใกล้เคียงเซรามิกมากกว่าแก้วที่ทำขึ้น มีสมบัติที่คงตัวทั้งในด้าน อุณหภูมิและขบวนการทางฟิสิกส์ ลักษณะเป็นผลึกที่บดแสง ไม่มีรูพรุน เป็นเม็ดละเอียด มีความ แข็งแรงมาก ทนต่อแรงดันได้ถึง 30,000 p.s.i. (Pound Per Square Inch) แก้วชนิดนี้ใช้ในจรวด นำวิถี อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์

2.6.2.7 แก้วนิรภัย (Safety Glass) แก้วชนิดนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

- แก้วนิรภัยแผ่นบาง (Laminated Safety Glass) เป็นแก้วที่ประกอบด้วยแผ่นบางมีความ หนา 0.125 นิ้ว 2 แผ่นประกบกันโดยมีพลาสติกที่มีสมบัติไม่แตกเชื่อมอยู่ ลักษณะของแก้วนี้คล้าย แซนวิช พลาสติกที่ใช้เป็นพวก Poly Vinyl Butyryl Resin เป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นมาก ทำ ให้แก้วใสในทุกสภาวะไม่มีผลต่อแสงอาทิตย์และไม่ต้องใช้กาวหรือวัสดุกั้นน้ำเลยในขณะที่นำมา ติดกัน



- แก้วนิรภัยแบบ Tempered แก้วชนิดนี้แข็งแรงและเหนียวมาก ใช้ทำประตู หน้าต่างรถยนต์ ท่อน้ำ สามารถทำให้โค้งงอได้ เป็นแก้วที่มีความเครียดภายในสูงฉะนั้นถ้าผิวหน้าแตกจะทำให้แก้วชนิดนี้แตกเป็นชิ้นเล็กๆหลายๆชิ้น การทำแก้วชนิดนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการแอนนิลเพื่อทำให้เกิดความเครียดไม่เท่ากันทั้งแผ่น

2.6.2.8 แก้วเปลี่ยนสี (Photo Chromic Silicate) เป็นแก้วที่เปลี่ยนเป็นสีดำหรือมืดลงเมื่อถูกกับแสงสว่าง แต่จะกลับคืนเป็นสีเดิมได้อีกเมื่อไม่มีแสงสว่างมาก สมบัติของแก้วชนิดนี้ต้องการปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible) แก้วชนิดนี้ใช้สำหรับทำเลนส์แว่นตา

นอกจากแก้วที่กล่าวมาแล้วนั้นยังมีแก้วอีกหลายชนิดที่ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์เฉพาะทางอีกหลายชนิดด้วยกัน สมบัติของแก้วที่ใช้ทางการค้าแสดงดังตารางที่ 2.1

## 2.7 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว [1, 10]

การหลอมแก้วให้มีคุณภาพดีตรงตามความต้องการได้นั้น จำเป็นต้องเลือกวัตถุดิบให้มีองค์ประกอบทางเคมีและการกระจายขนาดของวัตถุดิบ เพื่อให้เกิดการหลอมตัวที่ดี มีความสม่ำเสมอ และได้แก้วที่มีองค์ประกอบตามต้องการ วัตถุดิบแก้วโดยมากมักเป็นสาร Oxide แบ่งตามหน้าที่ได้ดังนี้

### 2.7.1 วัตถุดิบหลัก (Major Ingredients)

#### 2.7.1.1 วัตถุดิบที่เป็นโครงสร้างหลักของเนื้อแก้ว (Glass Former)

- ททราย (Silica or Quartz Sand) เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตแก้ว ทำให้แก้วทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องจากความร้อนต่ำ อาจมี Impurity เจือปน เป็นพวกโลหะหนัก ถ้ามีปริมาณมากจะทำให้แก้วที่ได้มีสีเขียว

- บอแรกซ์ ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$ ) และบอริกแอซิด ( $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) จะทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับเนื้อแก้ว และทำให้เนื้อแก้วมีสมบัติทนความร้อน ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยทำหน้าที่ไล่ฟองอากาศในเนื้อแก้วขณะหลอม รวมทั้งทำให้แก้วมีความแวววาว

#### 2.7.1.2 วัตถุดิบที่เป็นตัวช่วยหลอม (Fluxing Agent)

วัตถุดิบดังกล่าว เมื่อผสมเข้าไปในเนื้อแก้วจะทำให้วัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของแก้วมีจุดหลอมเหลวต่ำลง ทำให้แก้วหลอมตัวง่ายขึ้นและยังทำให้เนื้อแก้วมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป คือแก้วที่ได้จะมีความอ่อน และทำให้ Durability, Thermal Endurance, Heat Conductivity ของแก้วลดลง แต่เพิ่มค่า Linear Thermal Expansion Coefficient ประกอบด้วย

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของแก้วทางการค้า [5]

Type of glass	Viscosity data				Coefficient of linear thermal expansion $\times 10^{-7}$ (0-300°C)	Refractive index ( $n_D$ )	Log(volume resistance) (ohm-cm at 25°C)	Power factor	Dielectric constant (1 Mc., 20°C)
	Strain point* (°C)	Annealing point† (°C)	Softening point‡ (°C)						
Fused silica	1070	1140	1667	5.5	1.458	12.0	0.0002	3.78	
96% silica glass	820	910	1500	8.0	1.458	9.7	0.0005	3.80	
						11.2	0.00024	3.8	
						11.7	0.00019	3.8	
Soda-lime sheet glass	505	548	730	85	1.510	6.5	0.004	7.0	
Soda-lime plate glass	510	553	735	87	1.510	6.7	0.011	7.4	
Soda-lime container glass	505	548	730	85	1.520	7.0	0.011	7.6	
Soda-lime bulb glass	470	510	696	92	1.512	6.4	0.009	7.2	
Lead alkali silicate (etc.)	395	430	626	91	1.539	8.9	0.0016	6.6	
		435	630	89	1.560	10.1	0.0016	6.66	
High lead alkali silicate	390	430	580	91	1.639	11.8	0.0009	9.5	
Alumino silicate	670	715	915	42	1.534	11.4	0.0037	6.3	
	540	580	795	49	1.490	6.9	0.010	5.6	
Low expansion borosilicate	520	565	820	32	1.474	8.1	0.0046	4.6	
Low electrical loss Borosil	455	495		32	1.469	13.2	0.0006	4.0	
Borosilicate for tungsten seal	485	525	755	36	1.487	8.8	0.0027	4.7	
Borosilicate for Kovar seal	435	480	708	46	1.484	9.2	0.0026	5.1	

\* Strain point corresponds to a viscosity of  $10^{14.5}$  poises and represents a temperature, usually 35.0°C below the annealing point.  
† Annealing point corresponds to a viscosity of  $10^{13}$  poises and represents a temperature at which internal strains are reduced to an acceptable level in 15 minutes.  
‡ Softening point corresponds to a viscosity of  $10^{7.5}$  to  $10^8$  poises.

- โซเดียมคาร์บอเนตหรือ โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) Oxide ของโซเดียมจะทำให้โครงสร้างของ Silica ขาด จึงช่วยเร่งความเร็วของปฏิกิริยาในการหลอม ทำให้อุณหภูมิในการหลอมลดลงมาก
- เศษแก้วแตก (Cullet) เป็นวัตถุดิบที่ใช้ทำให้จุดหลอมเหลวของแก้วต่ำลง ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิง

### 2.7.1.3 วัตถุดิบที่ทำหน้าที่เสริมให้แก้วมีความคงทน (Stabilizer)

จากการใส่ส่วนประกอบที่เป็นตัวช่วยหลอมลงในแก้ว มีข้อเสียคือ จะทำให้แก้วที่ได้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีต่ำลง ละลายน้ำได้ง่าย มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นเนื่องจากความร้อนสูง ทำให้ไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพราะ ทั้งมีความหนืดและอัตราการเย็นตัวของแก้วไม่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นภาชนะ จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงโดยการใส่สารประกอบบางชนิดลงไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแก้วให้ดีขึ้น โดยพิจารณาทั้งในด้านการผลิตและนำไปใช้งาน ประกอบด้วย

- แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) จะทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงของเนื้อแก้ว เพิ่มอัตราเร็วในการแข็งตัวของเนื้อแก้ว ลดความหนืด เพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำและสารเคมี
- อลูมินา (Alumina) ช่วยทำหน้าที่เสริมโครงสร้างในเนื้อแก้ว ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน ได้ดี มีความทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมีมากขึ้น ช่วยควบคุมไม่ให้เกิดการตกผลึกในเนื้อแก้ว

## 2.7.2 วัตถุดิบรอง (Minor Ingredients)

2.7.2.1 สารฟอกสี (Decolorizing Ingredients) เช่น Selenium-Soda, Cobalt-Soda เป็นต้น ในการผลิตแก้วนั้น สิ่งเจือปนที่ต้องควบคุมมากได้แก่ ปริมาณของเหล็กออกไซด์ ซึ่งหากมีปริมาณมากกว่า 0.06 % จะทำให้เนื้อแก้วมีสีเขียว ดังนั้นจึงต้องเติมสารเคมีลงไปช่วยขจัดสีที่ไม่ต้องการ

2.7.2.2 สารไล่ฟอง (Refining Agents) เช่น  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ในการผลิตแก้วนั้นมักเกิดปัญหาฟองอากาศในเนื้อแก้วขึ้นเนื่องจากวัตถุดิบมีความละเอียดมากเกินไป ทำให้ไล่ฟองอากาศยาก หรือเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของสารคาร์บอเนตต่างๆ จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิดที่มีสารออกซิเจนลงไป เพราะก๊าซออกซิเจนพาฟองอากาศออกไปได้

2.7.2.3 สารควบคุมความหนืดหรือการไหลของแก้ว (Viscosity & Fluidity Controller) เช่น  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เนื่องจากแก้วเมื่อหลอมจะสามารถไหลตัวได้ง่าย ซึ่งการไหลตัวของแก้วนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนืดของแก้ว ซึ่งจะส่งผลอย่างสูงต่อกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ของแก้ว เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการควบคุมความหนืดของแก้วให้เหมาะสมกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วย

2.7.2.4 สารให้สี (Colorant) จะเป็นสารอนินทรีย์ที่ใส่เข้าไปเพื่อให้แก้วมีสีตามที่ต้องการ ซึ่งจะมีตัวอย่างตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสีที่เกิดขึ้นจากไอออนของธาตุในแก้ว [11]

Ion.	Function.	
	Net. Work Former.	Net. Work Modifier.
$\text{Cr}^{3+}$	—	green.
$\text{Cr}^{6+}$	yellow.	—
$\text{Cu}^{2+}$	yellowish-brown.	blue.
$\text{Cu}^+$	—	colourless, brown fluorescence.
$\text{Co}^{2+}$	blue.	pink.
$\text{Ni}^{2+}$	purple.	yellow.
$\text{Mn}^{2+}$	nearly colourless, green fluor. escence.	weak orange, with red fluores. cence.
$\text{Mn}^{3+}$	purple.	—
$\text{Fe}^{2+}$	—	absorption in the infra-red.
$\text{Fe}^{3+}$	deep brown.	weak yellow to pink.
$\text{U}^{6+}$	yellowish-orange.	weak yellow, strong green fluorescence.
$\text{V}^{3+}$	—	green.
$\text{V}^{4+}$	—	blue.
$\text{V}^{5+}$	colourless to yellow.	—

chromophore ion according as the latter occupies the network-former (N.W.F.) or the network-modifier (N.W.M.) position.

ตารางที่ 2.3 แสดงสารเคมีที่นิยมเติมลงไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของแก้ว [12]

สารเคมี	หน้าที่ของสารเคมี
SiO <sub>2</sub>	-ทำให้ผลิตภัณฑ์มีจุดหลอมเหลวสูง
CaO, MgO, Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O	-ทำให้หลอมง่ายขึ้น -ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวต่ำและมีความทนทานสูง
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-เพิ่มความทนทานต่อผลิตภัณฑ์
CaO, MgO	-ช่วยให้ผลิตภัณฑ์คงรูป (Set เร็ว) เร็วขึ้น
K <sub>2</sub> O	-ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม
PbO	-ทำให้เนื้อแก้วใส วาว ไม่แข็งกระด้างง่ายต่อการเจียรไน
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-ช่วยประหยัคเชื้อเพลิงขณะหลอม แต่จะทำให้เนื้อแก้วมีออกเจียว

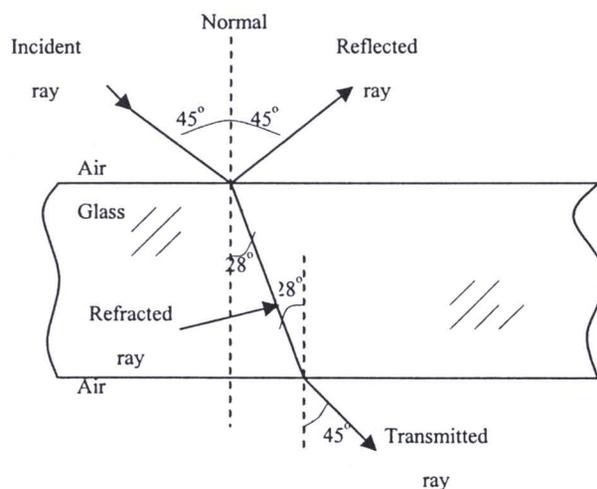
## 2.8 คุณสมบัติของแก้ว (Properties of Glass) [3, 7]

1. เป็นสารที่ไม่มีลักษณะเป็นผลึก ในบางครั้งจึงเรียกแก้วว่าเป็น Amorphous Solid
2. ไม่มีจุดหลอมเหลวที่แน่นอน ดังนั้นจึงนิยามอธิบายสมบัติต่างๆของแก้วในเทอมของความหนืด (Viscosity) หรือความต้านทานการไหล (Resistance of flow)
3. ทำให้โปร่งแสง โปร่งใสและทึบแสงได้ตามต้องการ
4. สามารถทำให้อ่อนตัวได้ด้วยความร้อน ทำให้สามารถทำเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย
5. ล้างและทำลายเชื้อโรคได้ง่าย
6. ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน
7. ไม่ทำปฏิกิริยากับกรด และด่างเกือบทุกชนิด
8. เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
9. ทำให้มีสีต่างๆได้
10. มีความเสถียรทางเคมีสูงที่อุณหภูมิปกติ
11. มีความแข็งแรงสูง

12. รับแรงอัดและดึงได้ดี (ยกเว้นแรงกระแทก)
13. เป็นตัวนำความร้อนที่เลว
14. ป้องกันการซึมของน้ำและอากาศได้ดี
15. ทนต่ออุณหภูมิสูง
16. มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำ

## 2.9 การหักเหและค่าดัชนีหักเหของแก้ว [13, 14, 15, 16]

การหักเห (Refraction) คือการที่แสงเบี่ยงเบนทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อแสงเดินทางผ่านวัตถุจากวัสดุหนึ่งไปสู่อีกชนิดหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากแสงเดินทางด้วยความเร็วที่ต่างกันในตัววัสดุต่างชนิด โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ขอบเขต (Boundary) ระหว่างวัสดุ 2 ชนิดนั้น ถ้าลำแสงตกกระทบบนที่ขอบเขตนี้ด้วยมุมค่าหนึ่ง ลำแสงตกกระทบบนจะถูกทำให้ช้าลงหรือเร็วขึ้นก่อนที่แสงจะผ่านไปสู่วัสดุชนิดใหม่ ทำให้ลำแสงเกิดการเบี่ยงเบนหรือหักเหที่ขอบเขตนี้ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นการหักเหเมื่อลำแสงเดินทางผ่านอากาศไปสู่แก้ว



รูปที่ 2.5 แสดงการหักเหเมื่อลำแสงเดินทางผ่านอากาศไปสู่แก้ว [15]

จากรูปที่ 2.5 เมื่อลำแสงเดินทางผ่านอากาศด้วยความเร็วค่าหนึ่ง แล้วตกกระทบบนผิวแก้วซึ่งเป็นขอบเขตระหว่างอากาศกับแก้ว โดยที่ลำแสงตกกระทบบน (Incident Ray) ทำมุม  $45^\circ$  จากนั้นแสงจะเดินทางไปจากเดิมกลายเป็นลำแสงหักเห (Refracted Ray) ที่มีมุม  $28^\circ$  ครั้นเมื่อลำแสงเดินทางมาถึงผิวแก้วอีกด้านหนึ่ง ซึ่งเป็นขอบเขตระหว่างแก้วกับอากาศ ลำแสงจะเกิดการหักเหออกจากแก้วไปสู่อากาศอีกครั้งหนึ่งด้วยมุม  $45^\circ$  และมีความเร็วเพิ่มขึ้นเท่ากับความเร็วในครั้งแรก



ในการหาค่าหักเหของวัตถุใดๆ จะแสดงออกมาในรูปแบบของ ค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ซึ่งต้องพิจารณาตามกฎของสเนล (Snell's Law) ที่มีกำหนดอยู่ 2 ข้อ คือ

1. เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งจะได้อัตราส่วนระหว่างมุม Sine ของแสงตกกระทบ ต่อมุม Sine ของแสงที่หักเห ทั้งนี้การหักเหขึ้นอยู่กับตัวกลางทั้งสองชนิด และความยาวคลื่นของแสง

2. แสงตกกระทบ, แสงหักเห และเส้นปกติ จะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน

ดังนั้นจากรูปที่ 2.5 จึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด (อากาศและวัสดุ) มุมตกกระทบ และมุมหักเห เป็นสมการค่าดัชนีหักเหได้ดังนี้

$$n_{\text{อากาศ}} \times \sin(\text{แสงตกกระทบ}) = n_{\text{วัสดุ}} \times \sin(\text{แสงหักเห}) \quad \text{หรือ}$$

$$n_{\text{อากาศ}} \times \sin(\text{มุมตกกระทบ}) = n_{\text{วัสดุ}} \times \sin(\text{มุมหักเห})$$

$$n_{\text{วัสดุ}} = \frac{n_{\text{อากาศ}} \times \sin(\text{มุมตกกระทบ})}{\sin(\text{มุมหักเห})}$$

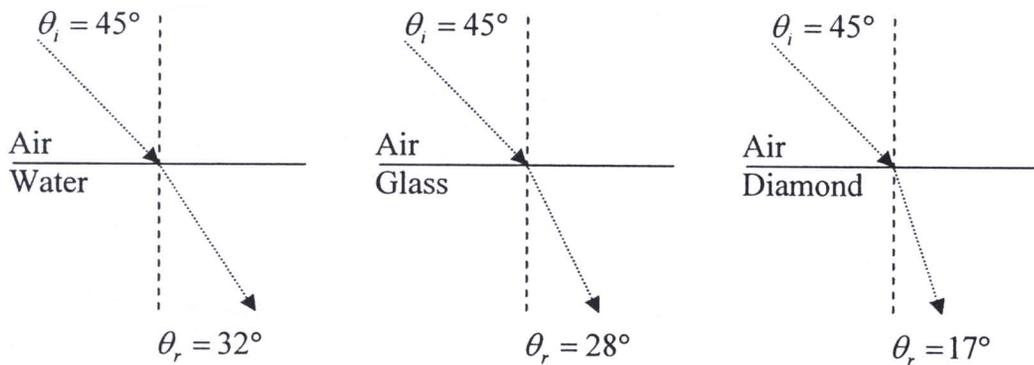
นอกจากนี้ ในการหาค่าดัชนีหักเหของวัสดุยังสามารถพิจารณาได้จาก ความเร็วแสงที่ผ่านตัวกลางทั้ง 2 ชนิด ซึ่งเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน จะทำให้ความเร็วแสงไม่เท่ากัน ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของวัสดุจึงเป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วแสงในอากาศหรือสุญญากาศและความเร็วแสงในวัสดุ ดังแสดงในสมการ

$$n_{\text{วัสดุ}} = \frac{\text{ความเร็วแสงในสุญญากาศ}}{\text{ความเร็วแสงในวัสดุ}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{\text{ความเร็วแสงในวัสดุ}}$$

เนื่องจากค่าดัชนีหักเหขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้พิจารณา ดังนั้นจึงต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic Light) และเป็นแสงโพลาไรซ์ ซึ่งปกติใช้แสงจากหลอดแสงโซเดียม ซึ่งเป็นแสงสีเหลือง ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 589.3 nm. ค่าเบี่ยงเบน (Bandwidth) ประมาณ 0.6 nm.

สำหรับวัสดุที่ไม่มีรูปผลึก เช่น แก้ว, อัมฟัน และวัสดุที่มีโครงสร้างเป็น Cubic จะเป็นวัสดุที่ให้แสงหักเหค่าเดียวเสมอ (Single Refracted Ray) เรียกวัสดุเหล่านี้ว่า Isotropic หรือ Single Refractive Materials

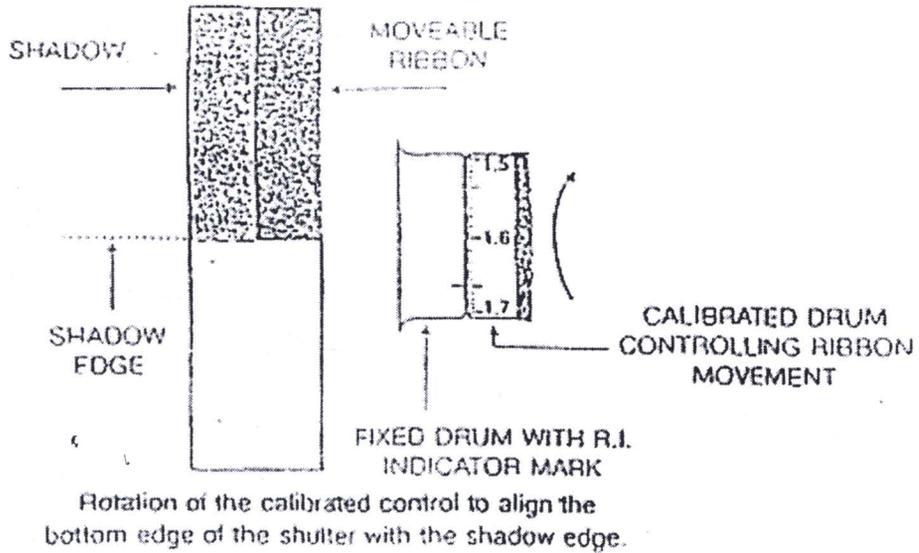
ค่าดัชนีหักเหจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความหนาแน่นของวัสดุนั้นๆ ดังเช่น ตัวกลางที่เป็นน้ำ แก้ว และเพชร ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการหักเหแสงผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน [15]

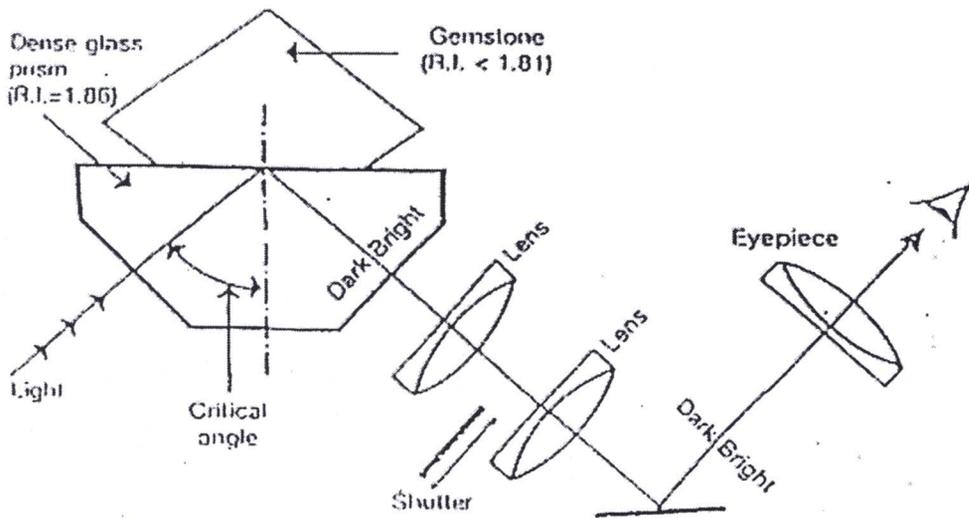
จากรูปเห็นได้ว่า น้ำซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าแก้วและเพชร มีการหักเหเล็กน้อย ทำให้ปรากฏมุมหักเหที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับแก้วและเพชรตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน สำหรับแก้วที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าเพชรจะมีมุมหักเหที่กว้างกว่าเพชร ดังนั้นถ้าเราทราบความหนาแน่นของวัสดุใดๆ จะสามารถประมาณค่าดัชนีหักเหของวัสดุนั้นได้ว่ามีค่ามากหรือน้อย

ค่าดัชนีหักเห (Refractive Index) สามารถหาได้โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Rayner Refractometer หลักการทำงานของเครื่อง Rayner Refractometer ที่ใช้อยู่นี้เป็นการวัดค่าเปรียบเทียบกับค่าดัชนีหักเหมาตรฐานของแผ่นแก้วปริซึมที่ติดอยู่กับเครื่อง ซึ่งมีค่าดัชนีหักเหเป็น 1.86 มีแหล่งกำเนิดแสงเป็น Yellow Light-Emitting สามารถวัดค่าดัชนีหักเหได้ตั้งแต่ 1.410 ถึง 1.810 ในการวัดดัชนีหักเหจะเลื่อน Ribbon Like Cursor มายังรอยต่อของแถบมืดแถบสว่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.7 แสดงการวัดค่าดัชนีหักเหด้วยเครื่อง Refractometer [16]

การวัดค่าดัชนีหักเห โดย Rayner Refractometer อาศัยหลักการของมุมวิกฤตที่เกิดขึ้นระหว่างตัวอย่างแก้วกับปริซึมทรงกลมที่ทำจากตะกั่ว ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.8 แสดงระบบการทำงานของเครื่อง Rayner Refractometer [16]

แสงจากแหล่งกำเนิดตกกระทบบริเวณรอยต่อระหว่างแก้วตะกั่วทรงกลมกับแก้วตัวอย่างเป็นมุมต่างๆ (บริเวณรอยต่อใส่ Contact Liquid เพื่อกำจัดฟิล์มบางของอากาศ) รังสีตกกระทบที่ทำมุม

กับเส้นปรกติน้อยกว่ามุมวิกฤต จะหักเหเข้าไปในแก้วตัวอย่าง ส่วนรังสีตกกระทบที่ทำมุมตกกระทบกับเส้นปรกติมากกว่ามุมวิกฤต จะสะท้อนกลับหมด จึงทำให้เกิดส่วนต่างๆของการหักเห และสะท้อนกลับหมดเป็นแถบมืดและแถบสว่าง ค่าครรชนหักเหจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรอยต่อระหว่างแถบมืดและแถบสว่างดังกล่าว

## 2.10 โพลาริเซชันของแสง (Polarization of Light) [24]

โพลาริเซชันของคลื่นคือ การที่คลื่นตามขวาง มีการสั่นในระนาบที่แน่นอนที่เรารู้จักกันดีคือ โพลาริเซชันของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) ชนิดหนึ่ง คลื่นตามขวางมีการสั่นในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่นสำหรับแสงการสั่นนี้คือ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นด้วย ถ้าคลื่นแสงถูกกรอง หรือถูกจำกัดให้มีสนามไฟฟ้าในระนาบที่แน่นอน สนามแม่เหล็กซึ่งตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ก็จะมีระนาบที่แน่นอนด้วย และแสงชนิดนี้เรียกว่าแสงโพลาริซ์(Polarized Light)

แสงตามธรรมชาติ เช่น แสงจากดวงอาทิตย์มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กหลายทิศทางผสมกันแบบสุ่มจัดว่าเป็นแสงไม่โพลาริซ์(Unpolarized Light)

### 2.10.1 โพลาริเซชันเชิงเส้น (Linear Polarization)

คือคลื่นแสงที่มีสนามไฟฟ้าในระนาบคงที่ เมื่อแยกสนามไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกันเป็นสนาม  $x$  และสนาม  $y$  จะพบว่าสนามไฟฟ้าทั้งสองมีเฟตตรงกัน

### 2.10.2 โพลาริเซชันวงกลม (Circular Polarization)

คือคลื่นแสงที่มีสนามไฟฟ้าในระนาบที่หมุนไปรอบๆทิศทางการเคลื่อนที่ โดยระนาบการหมุนคงที่ เมื่อแยกไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกันเป็นสนาม  $x$  และสนาม  $y$  จะพบว่าสนามทั้งสองมีเฟตต่างกัน 90 องศา แต่มีแอมพลิจูดเท่ากัน ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของโพลาริเซชันจะพบได้ในจอภาพบนคอมพิวเตอร์แบบพกพาหรือจอโทรทัศน์แบบบางที่เรียกว่า จอ LCD นั้นสามารถเลือกให้จุดแสงแสดงสีต่างๆหรือสีดำได้ โดยการบิดระนาบการโพลาริซ์ของแสง(ด้วยการควบคุมความต่างศักย์ของอิเล็กโตรด) เพื่อเลือกผ่านฟิลเตอร์แสงในรูปด้านซ้าย แสงมีโพลาริเซชันเชิงเส้นซึ่งไม่สามารถผ่านฟิลเตอร์จึงได้จุดสีดำบนจอภาพในรูปด้านขวา แสงถูกบิดระนาบ ซึ่งเป็นโพลาริเซชันวงกลมสามารถผ่านฟิลเตอร์จึงมีจุดเป็นสีต่างๆ บนจอแสดงภาพ

### 2.10.3 โพลาริเซชันวงรี (Elliptical Polarization)

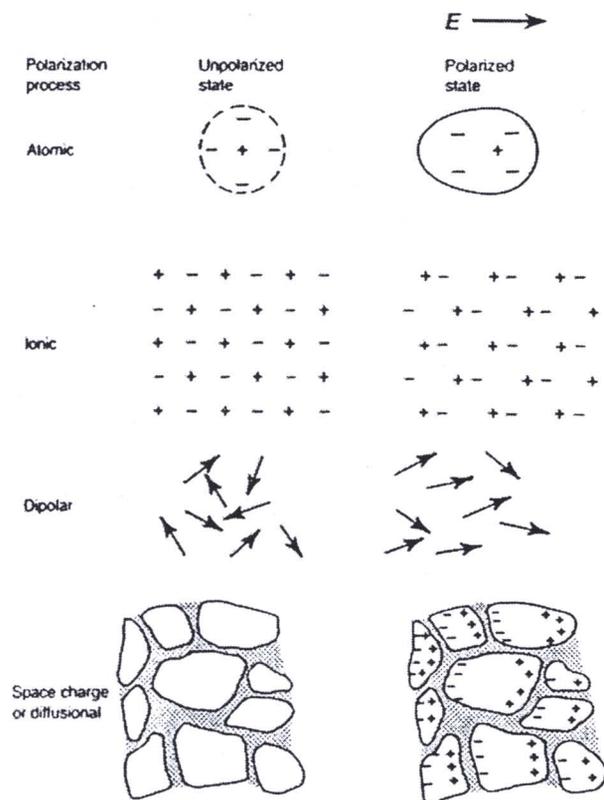
คือคลื่นแสงที่มีสนามไฟฟ้าในระนาบที่หมุนไปรอบๆ ทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งคงที่ เช่นเดียวกัน แต่ขนาดแอมพลิจูดไม่คงที่ทำให้เวกเตอร์สนามไฟฟ้ากวาดเป็นวงรี เมื่อแยกสนามไฟฟ้าออกเป็นสองส่วนที่ตั้งฉากกัน เป็นสนาม  $x$  และสนาม  $y$  จะมีแอมพลิจูดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันไม่เท่ากับ 90 องศา

Ellipsometry เป็นเทคนิคการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวัดการเกิดการเปลี่ยนโพลาริเซชันของแสงเอกรงค์ (Monochromatic Light) เนื่องจากการสะท้อนที่ผิวของฟิล์มบางจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาริเซชันของแสงบางส่วนวิเคราะห์โพลาริเซชันที่เปลี่ยนไปจะทำให้รู้ความหนาและชนิดของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของฟิล์มได้

## 2.11 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric properties) [13, 17]

### 2.11.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก เป็นสมบัติไดอิเล็กทริกในสนามไฟฟ้าสถิต (Dielectrics in static electric fields) คือ เมื่อให้สนามไฟฟ้าแก่สารไดอิเล็กทริกในอุดมคติ จะไม่มีการนำพาของประจุในช่วงพิสัยยาวเกิดขึ้น แต่จะมีเพียงการจัดเรียงประจุกันใหม่อย่างจำกัดเท่านั้น จึงต้องอาศัยโมเมนต์ขั้ว (dipole moment) และเรียกว่าการเกิดขั้วหรือการโพลาริเซชัน (polarization) การเกิดโพลาริเซชันในระดับอะตอม (ซึ่งมีอยู่ในวัสดุทุกชนิด) นั้นเป็นการกระจัดของอิเล็กตรอนในอะตอมที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของนิวเคลียส สำหรับในวัสดุไอออนิกจะมีการเกิดโพลาริเซชันแบบไอออนิก เกี่ยวข้องกับการกระจัดสัมพัทธ์ของแคตไอออนและแอนไอออนเพิ่มเติมเข้ามาอีก โดยสนามไฟฟ้าที่ใช้จะไปทำการจัดวางทิศทางของโมเลกุลภายในวัสดุเสียใหม่ ส่วนการเกิดโพลาริเซชันแบบประจุอวกาศ (space charge polarization) นั้นจะเกี่ยวข้องกับการขนส่งของพาหะนำประจุที่เป็นไปอย่างจำกัดจนกระทั่งพาหะเหล่านี้มาหยุดออกันอยู่ที่บริเวณกำแพงพลังงานศักย์ ซึ่งอาจจะเป็นขอบเกรนหรือขอบเฟส (phase boundary) ก็ได้ โดยกระบวนการเกิดโพลาริเซชันแบบต่างๆ นั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กระบวนการโพลาไรเซชันแบบต่าง ๆ [13]

โดยหลักการพื้นฐานแล้ว ขั้วคู่ไฟฟ้าจะประกอบด้วยสองจุดประจุที่มีขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกันอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $\delta x$  ซึ่งค่าโมเมนต์ขั้วคู่  $p$  ของแต่ละขั้วคู่ไฟฟ้านั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$P = Q\delta x \tag{2.3}$$

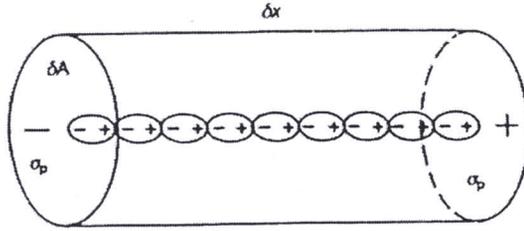
ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีความเป็นบวกอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากจากประจุลบไปยังประจุบวก

วัสดุที่มีการเกิดโพลาไรเซชันนั้นก็เปรียบเสมือนกับปริซึมขั้วคู่มูลฐาน (elementary dipolar prisms) ที่มีความหนาแน่นประจุของพื้นผิวหน้าที่อยู่ตรงปลายปริซึมด้านหนึ่งเป็น  $+\sigma_p$  และอีกด้านหนึ่งเป็น  $-\sigma_p$  ดังในรูปที่ 2.10 สำหรับค่าโมเมนต์ขั้วคู่ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้นจะเรียกว่า การเกิดขั้วหรือโพลาไรเซชัน (polarization)  $P$  และสามารถมีการเปลี่ยนแปลงไปได้ในแต่ละย่าน จากรูปที่ 2.10 จะได้ขนาดของเวกเตอร์ต่าง ๆ เป็น

$$\delta p = \sigma_p \delta A \delta x = \sigma_p \delta V$$

หรือ 
$$\frac{\delta p}{\delta V} = P = \sigma_p \tag{2.4}$$

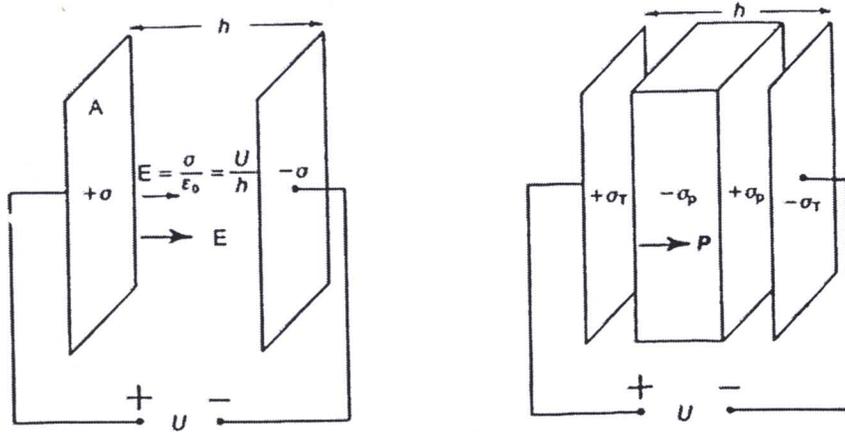
โดยทั่วไปแล้ว  $\sigma_p = n.P$  เมื่อ  $n$  เป็นเวกเตอร์หน่วยที่พุ่งตั้งฉากตรงออกมาจากพื้นผิวล้อมปิดของวัสดุที่มีการเกิดโพลาไรเซชัน



รูปที่ 2.10 ปริซึมมูลฐานของวัสดุที่มีการเกิดโพลาไรเซชัน [13]

ความสัมพันธ์ที่สำคัญหลาย ๆ อย่างนั้น สามารถพบได้จากการพิจารณาถึงอิทธิพลของการนำสารไดอิเล็กทริกมาใส่เข้าไปในช่องว่างที่อยู่ระหว่างแผ่นระนาบคู่ขนานของตัวเก็บประจุแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจากทฤษฎีของเกาส์ (Gauss's theorem) นั้นสนามไฟฟ้า  $E$  ทั้งที่อยู่ระหว่างและที่ตั้งฉากอยู่กับแผ่นระนาบคู่ขนานที่มีความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวเป็น  $\sigma$  และมีสุญญากาศกั้นอยู่จะมีค่าเป็น

$$E = \sigma / \epsilon_0 \tag{2.5}$$



รูปที่ 2.11 บทบาทของสารไดอิเล็กทริกในตัวเก็บประจุ [13]

เนื่องจากว่ามีการให้ความต่างศักย์ขนาดเท่ากันแก่ทั้งสถานะ (ก) และ(ข) ดังนั้น  $E$  จึงเป็นเช่นเดิมแต่ในกรณี (ข) นั้น ความหนาแน่นประจุที่มาจากการเกิดโพลาไรเซชัน  $\sigma_p$  บนผิวหน้าของสารไดอิเล็กทริกจะไปหักล้างกันกับความหนาแน่นประจุรวม  $\sigma_T$  บางส่วนที่อยู่บนแผ่นระนาบด้วยเหตุนี้ความหนาแน่นประจุยังผลที่ทำให้เกิด  $E$  ในกรณี (ข) จึงลดลงเหลือเพียง  $\sigma_T - \sigma_p$  และจะได้ว่า

$$E = \frac{\sigma_T - \sigma_p}{\epsilon_0} \tag{2.6}$$

ความหนาแน่นประจุโดยรวม  $\sigma_T$  จะสมมูลกันกับขนาดของเวกเตอร์การกระจัดทางไดอิเล็กทริก  $D$  ดังนั้นจึงได้ว่า

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (2.7)$$

ถ้าสารไดอิเล็กทริกที่พิจารณาอยู่นั้นมีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้น การเกิดโพลาริเซชันก็จะเป็นส่วนสำคัญกับค่าสนามไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวของวัสดุ ซึ่งถือว่าเป็นกรณีแบบปรกติทั่วไปและจะได้ว่า

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (2.8)$$

เมื่อค่าคงที่ไร้หน่วยอย่างใด ( $\chi_e$ ) เป็นสภาพรับไว้ได้ทางไฟฟ้า (electric susceptibility) โดยปรกติแล้ว  $\chi_e$  เป็นเทนเซอร์ (tensor) ลำดับที่สอง ถ้าสมมุติว่า  $P$  และ  $E$  นั้นร่วมเส้นตรงกัน  $\chi_e$  จะเป็นสเกลาร์ (scalar) อย่างง่ายและจาก (2.7) และ (2.8) จะได้ว่า

$$D = \epsilon_0 E + \chi_e \epsilon_0 E = (1 + \chi_e) \epsilon_0 E \quad (2.9)$$

เนื่องจาก  $D = \sigma_T$ ,

$$\frac{Q_T}{A} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \frac{U}{h} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $Q_T$  เป็นค่าประจุมบนบนแผ่นตัวเก็บประจูดังนั้นจึงได้ค่าความจุ ( $C$ ) เป็น

$$C = \frac{Q_T}{U} = (1 + \chi_e) \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.11)$$

เนื่องจากสูญญากาศนั้นมีค่าสภาพรับไว้ได้เป็นศูนย์ ตัวเก็บประจุที่เป็นเพียงแผ่นคู่ขนานอันว่าเปล่าจึงมีค่าความจุ ( $C_0$ ) เป็น

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.12)$$

ถ้านำสารไดอิเล็กทริกที่มีค่าสภาพรับไว้ได้  $\chi_e$  มาใส่เข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นคู่ขนานก็ จะทำให้ค่าความจุเพิ่มขึ้นด้วยค่าตัวประกอบ  $1 + \chi_e$  ซึ่งสภาพยอม (permittivity) หรือ  $\epsilon$  ของสารไดอิเล็กทริกนั้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \quad \text{เมื่อ} \quad \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = (1 + \chi_e) \epsilon_r$$

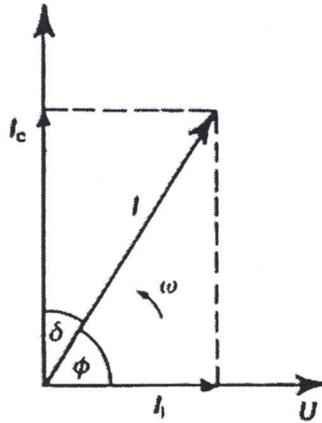
ดังนั้น ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีสารไดอิเล็กทริกระหว่างแผ่นคู่ขนาน เป็นดังความสัมพันธ์

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  เป็นสภาพยอมสัมพัทธ์ (relative permittivity) หรือที่นิยมเรียกกันว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ของสารไดอิเล็กทริกนั่นเอง

### 2.11.2 การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (Dielectric loss tangent)

เมื่อสารไดอิเล็กทริกอยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ กระแสที่ไหลผ่านสารไดอิเล็กทริกจะมีเฟสนำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90 องศา แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียเนื่องจากการที่ไดอิเล็กทริกมีความต้านทานไม่ถึงอนันต์ ทำให้เกิดเฟสของกระแสไฟฟ้านำหน้าความต่างศักย์น้อยกว่า 90 องศา ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะเฟสที่เกิดขึ้นในสารไดอิเล็กทริกเมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ [13]

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดการสูญเสียพลังงาน โดยการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยสามารถหาได้โดยพิจารณากระแสที่ทำให้เกิดการสูญเสีย  $I$

$$\begin{aligned}\bar{P} &= \frac{1}{T} \int_0^T UI \, dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U_o \sin(\omega t) I_o \cos(\omega t - \delta) \, dt\end{aligned}\quad (2.14)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (2.14) จะได้

$$\bar{P} = \frac{1}{2} I_o U_o \sin \delta$$

เนื่องจาก  $I_o = I_c / \cos \delta$  และ  $I_c = \omega U_o C$  ดังนั้น พลังงานที่สูญเสียเฉลี่ย คือ

$$\bar{P} = \frac{1}{2} U_o^2 \omega C \tan \delta\quad (2.15)$$

เมื่อ  $U_o / \sqrt{2}$  และ  $I_o / \sqrt{2}$  คือ ความต่างศักย์รากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (rms voltage) และ กระแสรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย (rms current) ตามลำดับ

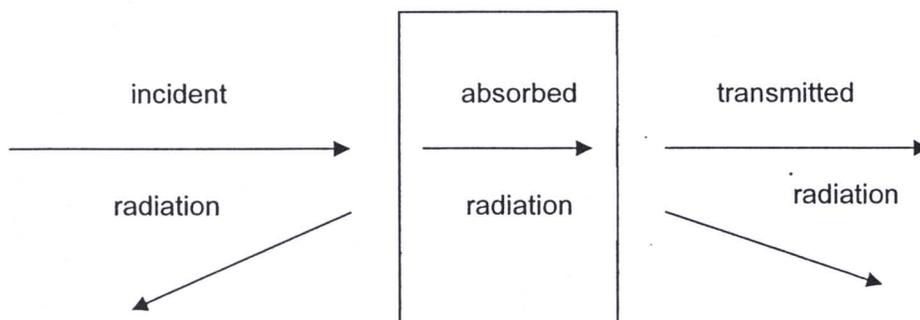
โดยที่  $\tan \delta$  เรียกว่า การสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss tangent)

## 2.12 อุลตราไวโอเลตวิสิเบิลสเปกโทรเมตรี (Ultraviolet Visible Spectrometry or Ultraviolet Visible Spectroscopy ) [25]

สเปกโทรสโคปี (spectroscopy) เป็นศาสตร์ที่ศึกษาเกี่ยวกับการวัดการดูดกลืน (absorption) หรือการคาย (emission) รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic radiation) ของสาร โดยเฉพาะสารส่วนใหญ่สามารถดูดกลืนคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet UV) และช่วงแสงที่มองเห็นได้ (visible) ได้ จากสมบัตินี้จึงนำมาใช้เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่เรียกว่า ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโคปี (UV-Vis spectroscopy)

การดูดกลืนแสงหรือรังสีที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร ของสารเคมี สมบัติของสารดังกล่าวนี้ได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความถูกต้องแม่นยำและมีสภาพไว (sensitivity) สูง โดยอาจทำการวิเคราะห์อยู่ในรูปของธาตุหรือโมเลกุลก็ได้ แต่การที่จะพิสูจน์ว่าสารตัวอย่างเป็นสารอะไร มีโครงสร้างอย่างไร จำเป็นต้องใช้เทคนิคอื่นเข้าช่วยเพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำ

เมื่อให้ลำแสงที่เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องกัน (continuous beam of radiation) ผ่านเข้าไปในวัตถุใส จะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนกระเจิง และบางส่วนทะลุออกไปดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลำแสงที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุใส [25]

ถ้าให้ลำแสงที่ทะลุออกไปนั้นผ่านเข้าเครื่องกระจายแสง (เช่น ปริซึม หรือเกรตติง) จะเห็นว่าสเปกตรัมหายไปบางส่วน ส่วนที่หายไปจะเรียกว่า absorption spectrum และพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับของพลังงานจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น

### 2.12.1 กฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) มีใจความว่า

“เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic light) ผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่กระทบตัวกลางนั้น และความเข้มของแสงจะถูกแต่ละชั้นของตัวกลางดูดกลืนไว้ในสัดส่วนที่เท่ากัน”

กฎของเบียร์ (Beer's law) มีใจความว่า

“เมื่อแสงที่มีความยาวคลื่นเดี่ยวผ่านตัวกลางเนื้อเดียว สัดส่วนของความเข้มของแสงที่ถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนไว้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของตัวกลางที่ดูดกลืนแสงนั้น”

เมื่อเราวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย ปริมาณความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายและความหนาของสารละลายที่ลำแสงต้องผ่าน จึงจำเป็นต้องรวมกฎของเบียร์และกฎของแลมเบิร์ต เรียกเป็น กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law)

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างเราสามารถทำได้โดยให้ลำแสงผ่านเข้าไปในตัวอย่าง (Incident light:  $I_0$ ) แล้ววัดปริมาณแสงที่เหลือผ่านออกมา ( $I$ ) โดยเทียบกับแสงที่ผ่านออกมาเมื่อไม่มีสารตัวอย่าง

### 2.12.2 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้น

(absorbance and concentration) ค่าการดูดกลืนแสงของสารมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงปริมาณวิเคราะห์

เนื่องจากค่าการดูดกลืนจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มข้นตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ

$$A = cl$$

เมื่อ  $A$  = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)

= เป็น สมบัติจำเพาะของสาร ที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง

เรียกว่า molar absorptivity ( $L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ )

$l$  = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่าง หรือความกว้างของเซลล์นั่นเอง (cm)

$c$  = ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือ โมลาร์ (M)

ถ้าความเข้มข้นของสารอยู่ในหน่วยอื่นจะเขียนสมการเป็น

$$A = acl$$

การเบี่ยงเบนจากกฎของเบียร์ (deviation from Beer's law) เราทราบมาแล้วจากกฎของเบียร์ว่า ค่าการดูดกลืนจะแปรผันโดยตรง

กับความเข้มข้น ดังนั้นเมื่อเราพล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืน (A) กับความเข้มข้น (c) เมื่อความหนาของเซลล์คงที่ จะได้กราฟเส้นตรง แต่ในบางครั้งพบว่าอาจจะเกิดการเบี่ยงเบนได้ ความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งอาจเป็นการ เบี่ยงเบนในเชิงบวก (positive deviation) คือค่าการดูดกลืนให้แนวโน้มสูงกว่าปกติ ทำให้กราฟที่ได้โค้งขึ้น หรือเป็นการเบี่ยงเบนเชิงลบ (negative deviation) คือค่าการดูดกลืนมีแนวโน้มต่ำกว่าปกติ ทำให้กราฟได้โค้งลง

ซึ่งการเบี่ยงเบนดังกล่าวมาจากสาเหตุหลัก 2 ประการ ได้แก่

1. การเบี่ยงเบนทางเคมี (chemical deviation)
2. การเบี่ยงเบนจากเครื่องมือ (instrumental deviation)

การเบี่ยงเบนทางเคมี (chemical deviation) เกิด จากสารที่ต้องการวิเคราะห์เกิดการสลายตัว การรวมตัว หรือทำปฏิกิริยากับตัวทำละลาย แล้วกลายเป็นสารตัวอื่นที่ให้ absorption spectrum ต่างจากสารที่ต้องการจะวิเคราะห์ ทำให้ผลเบี่ยงเบนออกจากกฎของเบียร์ ยกตัวอย่างเช่น การรวมตัวกันของโมเลกุล ทำให้การดูดกลืนแสงต่อโมเลกุลลดลง ดังนั้นจึงเกิดการเบี่ยงเบนเชิงลบ

เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis spectroscopy ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจาก ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-Vis spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบหลักๆ ที่เหมือนกัน ได้แก่แหล่งกำเนิดแสง เกรตติงหรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสงจะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้ คือ หลอดทังสเตน-ฮาโลเจน ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 นาโนเมตร สำหรับแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดควิที เรียมซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 นาโนเมตร แต่แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีความยาวคลื่นต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้โมโนโครเมเตอร์เป็นตัวกระจายแสงออกเพื่อให้แสงที่จะผ่านไป ยังตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการหลังจากนั้นแสงความยาวคลื่น ค่าเดียวจะผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ (cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างภายใน 1 เซนติเมตร (ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวอย่างตามกฎของ Beer-Lambert) เครื่อง UV-Vis spectrophotometer บางรุ่น สามารถใช้หลอดทดลองเป็น cuvettes ได้ แต่ cuvettes ที่ดีที่สุดนั้นทำมาจากควอทซ์ที่มีคุณภาพสูง สำหรับ cuvettes ที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงแสงขาวเท่านั้นเพราะแก้วและพลาสติกดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีแสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืนจะเดินทางผ่านตัวอย่างมาถึงเครื่อง ตรวจวัด สำหรับเครื่อง

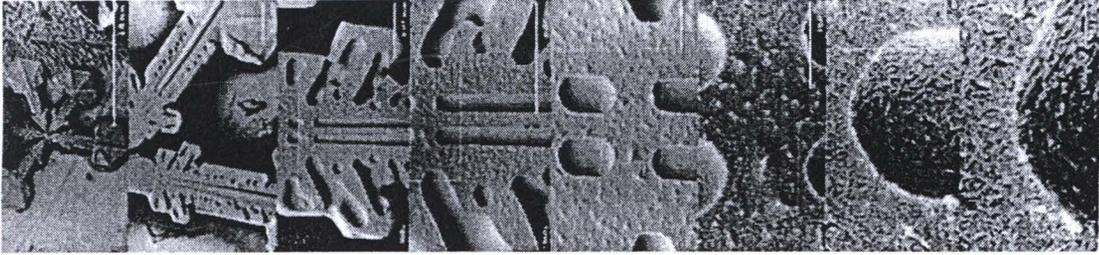
ตรวจวัดที่นิยมใช้ ได้แก่ PMT (photomultiplier tube), diode arrays และ CCDs (charge coupled devices) เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ผลของสเปกตรัมที่ได้จะแสดงในรูปของกราฟระหว่างค่า absorbance และค่าความยาวคลื่น

เครื่อง UV-Vis spectrophotometer สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ สำหรับเครื่องแบบ ลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดี่ยวจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือนี้ได้รับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่ายสะดวก และมีราคาไม่แพงมากนัก สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่ นั้น แสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ก่อนที่จะไปตกลงบนตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิงขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัวเพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสงที่มาจากตัวอย่างได้พร้อมกัน แต่ในบางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัว beam chopper ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้

### 2.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [18, 19]

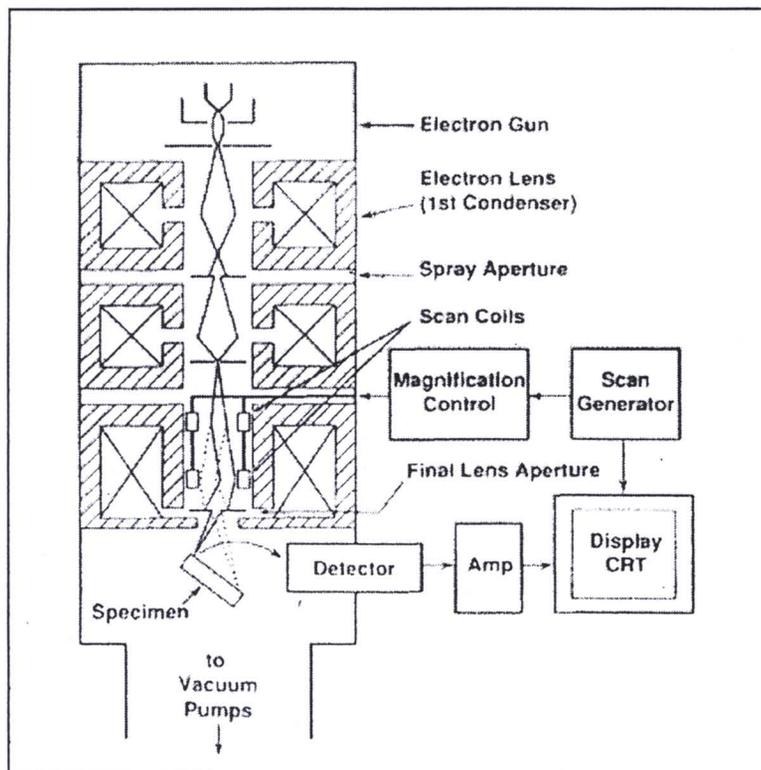
การศึกษาโครงสร้างจุลภาคทางแสงนั้นยังมีข้อจำกัดหลายด้านอาทิเช่น สามารถวิเคราะห์โครงสร้างที่กำลังขยายต่ำ 10-1000 เท่า และข้อจำกัดด้านความชัดลึก (depth of field) ของภาพขยาย กล่าวคือ ยิ่งกำลังขยายมากขึ้น ระยะชัดลึกยิ่งน้อยลง จึงทำให้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดเป็นเทคนิคที่นิยมในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคมากกว่าเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แสง เนื่องจากเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีจุดเด่น คือ มีระยะชัดลึกมากกว่า และ อำนาจแยกเชิงระยะ (Spatial resolution) สูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แสง เนื่องจากอุปกรณ์ทั้ง 2 ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่างกันในการสร้างภาพ

กล้องจุลทรรศน์แสงจะใช้คลื่นแสง ซึ่งเป็นแสงที่ตามนุษย์มองเห็น และมีความยาวคลื่นสั้นอยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร ทำให้กล้องจุลทรรศน์แสงไม่สามารถขยายวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่า 0.2 ไมครอนได้ ในขณะที่กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดใช้คุณสมบัติของคลื่นอิเล็กตรอน ซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นกว่า ทำให้กล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้ มีอำนาจแยกแยะเชิงระยะได้มากถึง 0.2 นาโนเมตร และ ความสามารถของกล้องที่สามารถบีบลำอิเล็กตรอนให้เป็นมุมแคบๆ ได้ จึงทำให้ได้ภาพที่มีความชัดลึกสูง ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงอำนาจแยกแยะของ SEM [19]

หลักการทํางานและส่วนประกอบโดยสังเขปของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงได้ดังรูปที่ 2.15 ส่วนบนสุดของรูปเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ที่มีสภาพเป็น สูญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (accelerating voltage) ในช่วง 0-30 kv ซึ่งกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบางเครื่องอาจใช้ความต่างศักย์เร่งได้สูงถึง 50 kv และทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และ ปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน



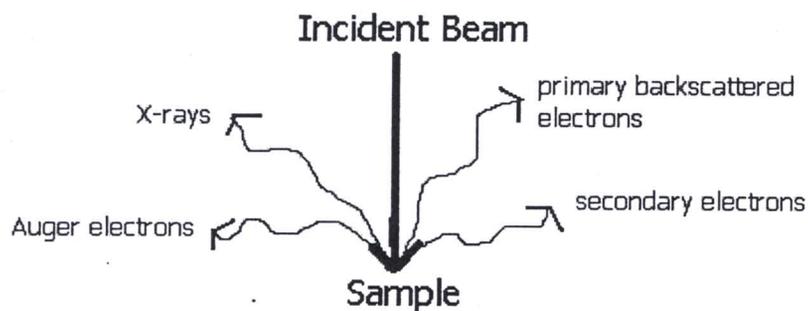
รูปที่ 2.15 ภาพแสดงการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [18]

เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (condenser lens) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนให้มีลำอิเล็กตรอนเล็กลง

สำหรับเลนส์วัตถุ (Objective lens) จัดเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกกระทบบนตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ โดยมี สแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนไปบนผิวตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวตัวอย่างที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้จะเกิดสัญญาณ (signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดขณะเดียวกัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก็จะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปยังหน่วยประมวลผลเป็นภาพแสดงบนหน้าจอต่อไป

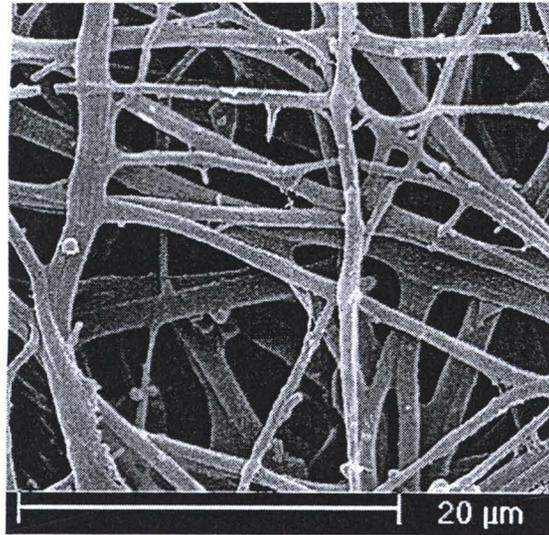
### 2.12.1 สัญญาณต่าง ๆ (Various types of signal)

สัญญาณแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสสาร และอันตรกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นตามมา แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงสัญญาณต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสสาร [18]

2.13.1.1 สัญญาณแบบอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron, SE) ให้ข้อมูลลักษณะพื้นผิว และเป็นสัญญาณที่เรานำมาสร้างภาพมากที่สุด อิเล็กตรอนทุติยภูมิยังมีแบบย่อย ๆ อีกหลายแบบตามกลไกและแหล่งกำเนิด ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [19]

2.13.1.2 สัญญาณแบบอิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับ (Back scattered Electron, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนผสมทางเคมี และลักษณะโทโพกราฟฟีของพื้นผิว ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ภาพจากสัญญาณอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ [19]

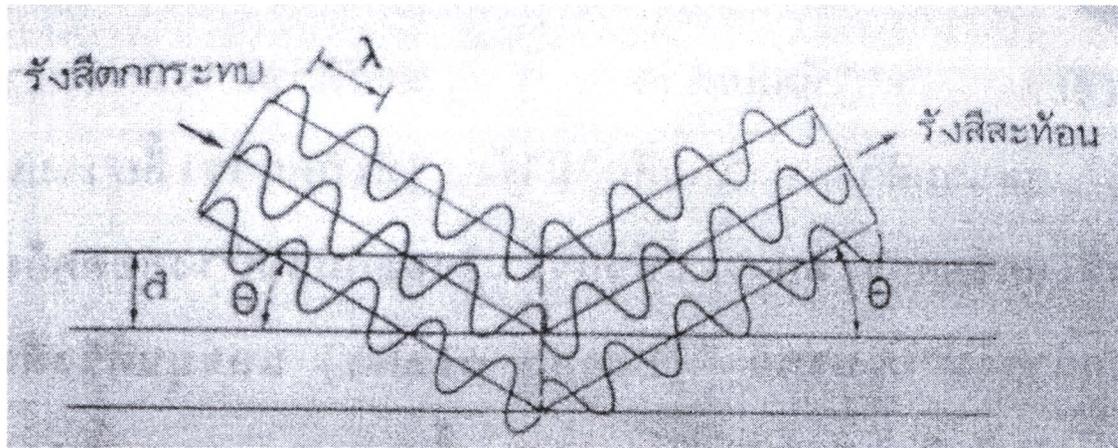
2.14 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [15]

2.14.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

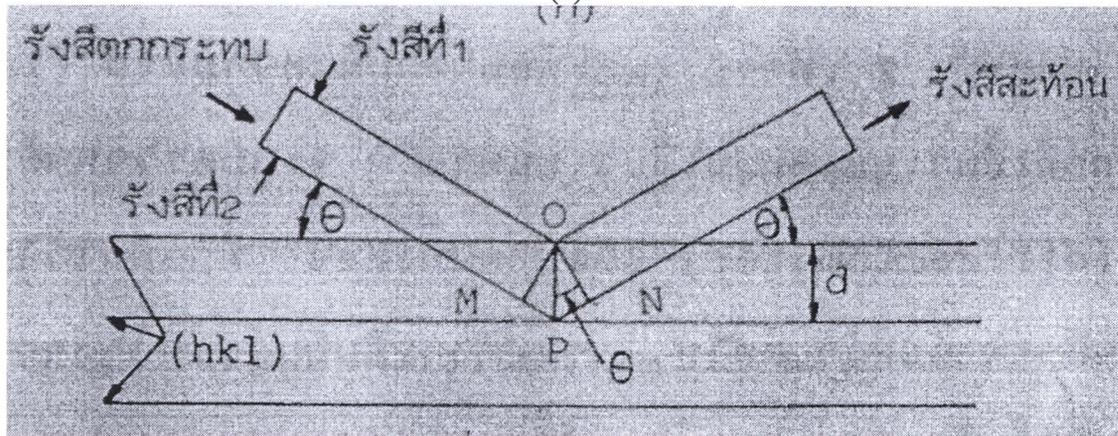
รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง และมีความยาวคลื่นระหว่าง 0.05-0.25 นา



โนเมตร รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเร่งอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงมากวิ่งเข้าชนเป้าซึ่งเป็นโลหะหนัก ทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิด คือรังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray) และรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) รังสีเอ็กซ์จะแสดงสมบัติเชิงแสง เกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากคลื่นผ่าน โครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน หากพิจารณาบริเวณที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนอะตอม รังสีเอ็กซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาค คือกระเจิงออกทุกทิศทาง นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อแบรกก์ (Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่ากับความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law)



(a)



(b)

รูปที่ 2.19 (a) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (b) ทางเดินรังสีเอ็กซ์ [15]

จากรูปที่ 2.19 รังสีเอ็กซ์ที่ 1 มีเฟสเดียวกับรังสีเอ็กซ์ที่ 2 แต่รังสีเอ็กซ์ที่ 2 มีระยะทางยาวกว่าเป็นระยะทาง MP+PN จากกฎของแบรกก์ผลต่างทางเดินมีค่าเท่ากับ  $n\lambda$  โดยที่  $n$  หมายถึงจำนวน

เท่าและ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น นอกจากนั้นจะเห็นว่าระยะ MP และ PN ต่างมีค่าเท่ากับ  $d_{hkl}\sin\theta$  ดังนั้น

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.16)$$

เมื่อ  $d_{hkl}$  คือระยะระหว่างระนาบ

$\theta$  คือมุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

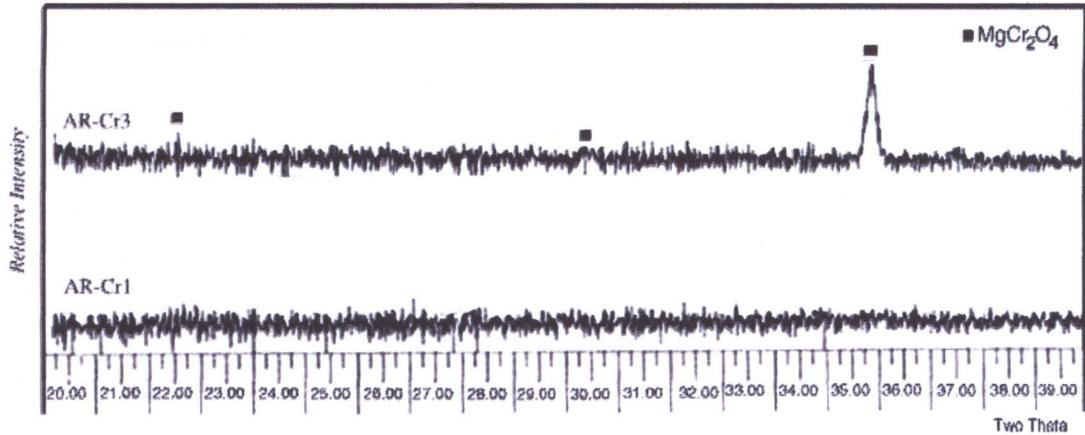
$n$  คือลำดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

### 2.14.2 การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เพาเตอร์

เป็นการใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างที่บดเป็นผงละเอียด ซึ่งผลึกของตัวอย่างจะมีการวางตัวแบบสุ่ม (random) ระบายต่างๆในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระบายใดที่เอ็กซ์เรย์ตกกระทบ แล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระบายแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อนจากนั้น ปริมาตรรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนด้วยมุมต่างๆ จะถูกตรวจจับด้วยดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (diffractometer) และค่าที่บันทึกไว้จะสามารถนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้ เนื่องจากค่าความเข้มและมุมเลี้ยวเบนของที่ได้ (diffraction pattern) ของแต่ละธาตุหรือสารประกอบจะมีความแตกต่างกัน

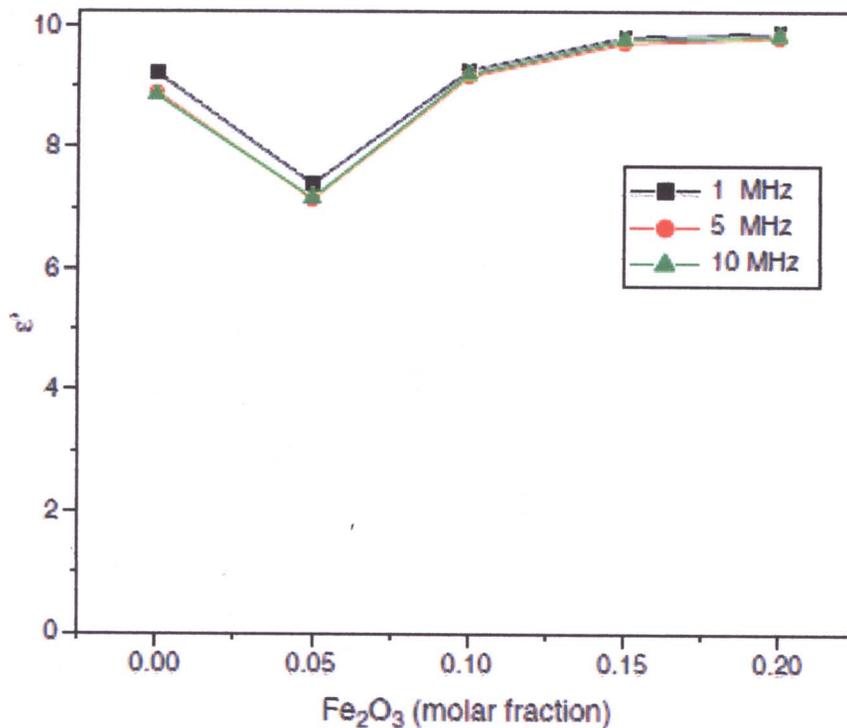
### 2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2005 M.Rezvani และคณะ [20] ได้ทำการทดสอบอิทธิพลของโครเมียมที่มีต่อการเกิดผลึกในแก้วเซรามิก  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO(R}_2\text{O)}$  โดยการเจือโครเมียมออกไซด์ลงในแก้ว 1, 3 และ 5%wt เหนืออุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วขึ้นรูปบนแผ่นสแตนเลส ทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว แล้วนำไปทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าเมื่อเจือโครเมียมออกไซด์ 1%wt แก้วจะมีลักษณะเป็นอสัณฐาน ไม่แสดงความเป็นผลึกแต่เมื่อเจือโครเมียมออกไซด์ 3%wt โครเมียมออกไซด์จะไปจับกับแมกนีเซียมออกไซด์ เกิดเป็นผลึกของ  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$  ขึ้นในแก้ว ดังรูปที่ 2.20

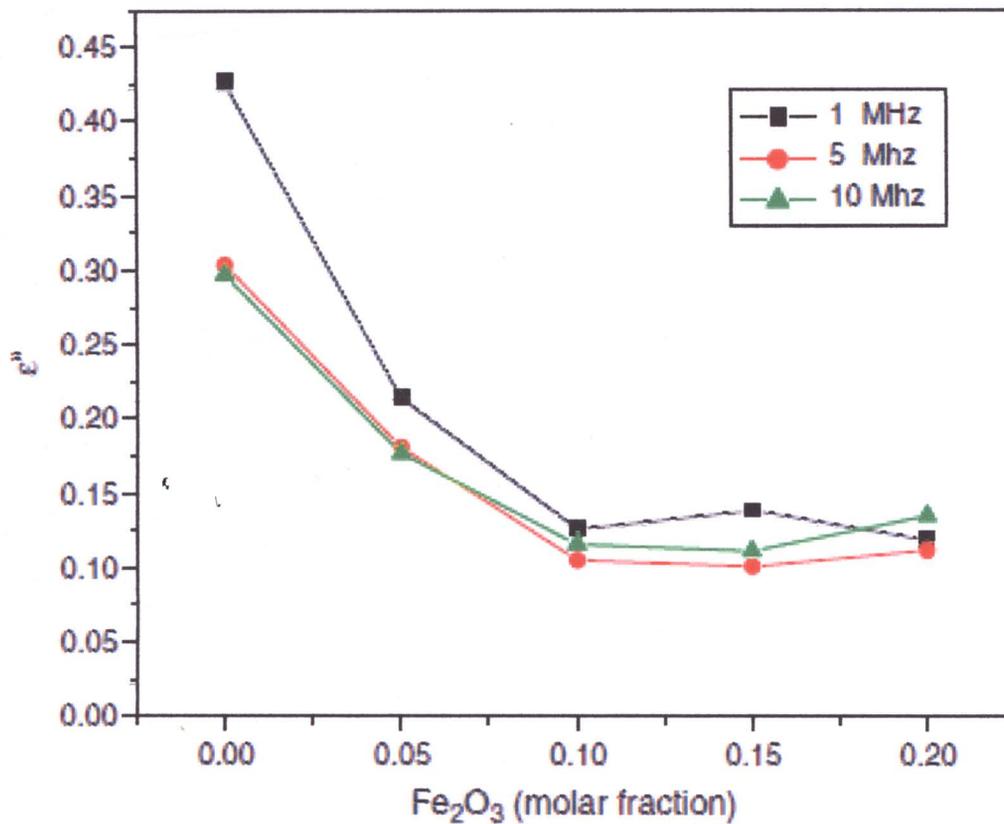


รูปที่ 2.20 XRD patterns ของแก้วเซรามิก  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO(R}_2\text{O)}$  ที่เจือโครเมียม 1 และ 3%wt [20]

ปี ค.ศ. 2011 F.E. Salman และ A. Mekki [21] ทำการเตรียมแก้วโซดาที่เจือด้วยเหล็กออกไซด์ 0, 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 โดยสัดส่วนโมล และทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแก้ว โดยใช้ความถี่ 1, 5 และ 10 MHz ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงเมื่อเจือเหล็กออกไซด์ แต่เมื่อมีปริมาณเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กทริกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.21 และ 2.22

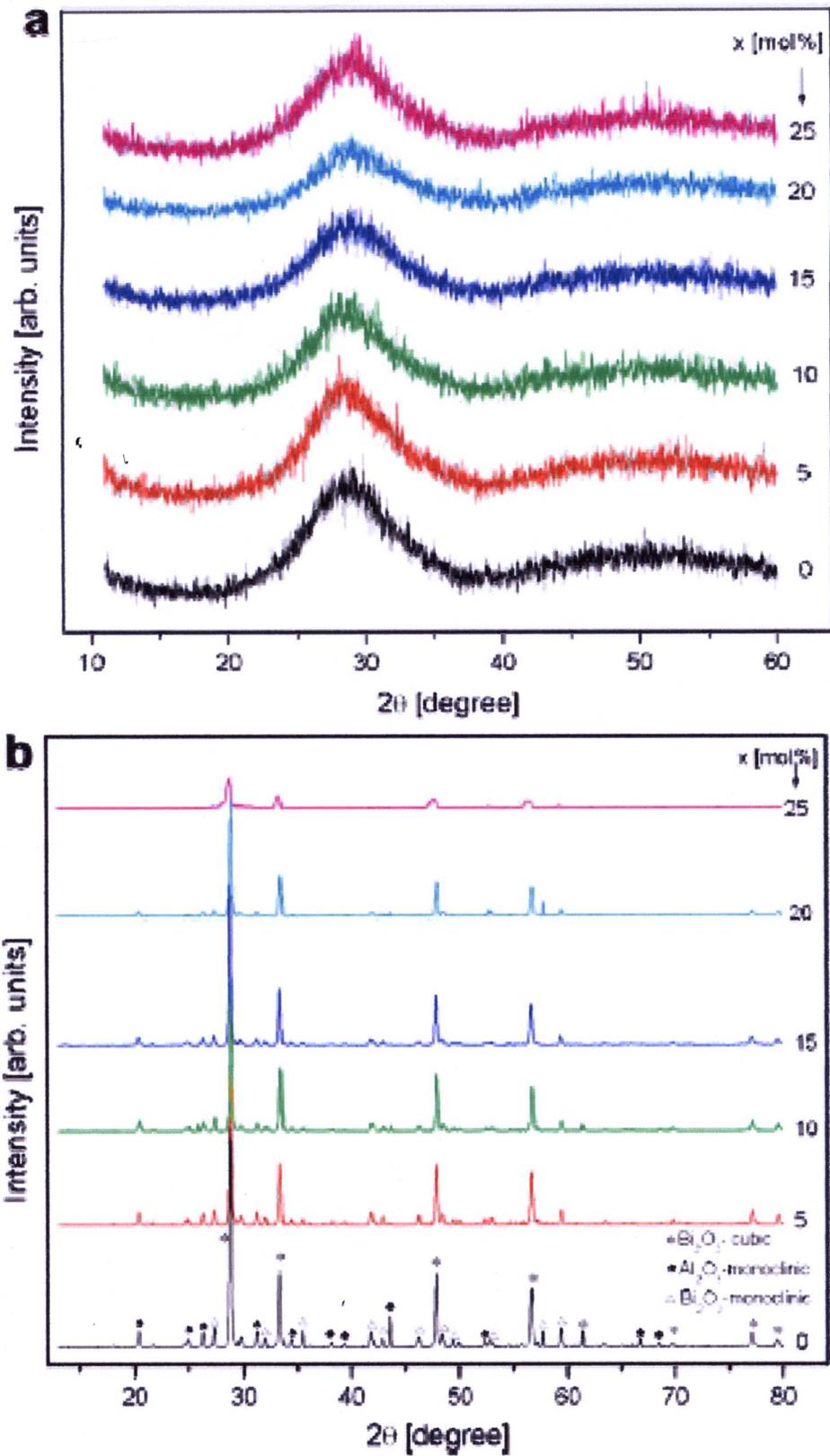


รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กทริกกับปริมาณเหล็กออกไซด์ [21]



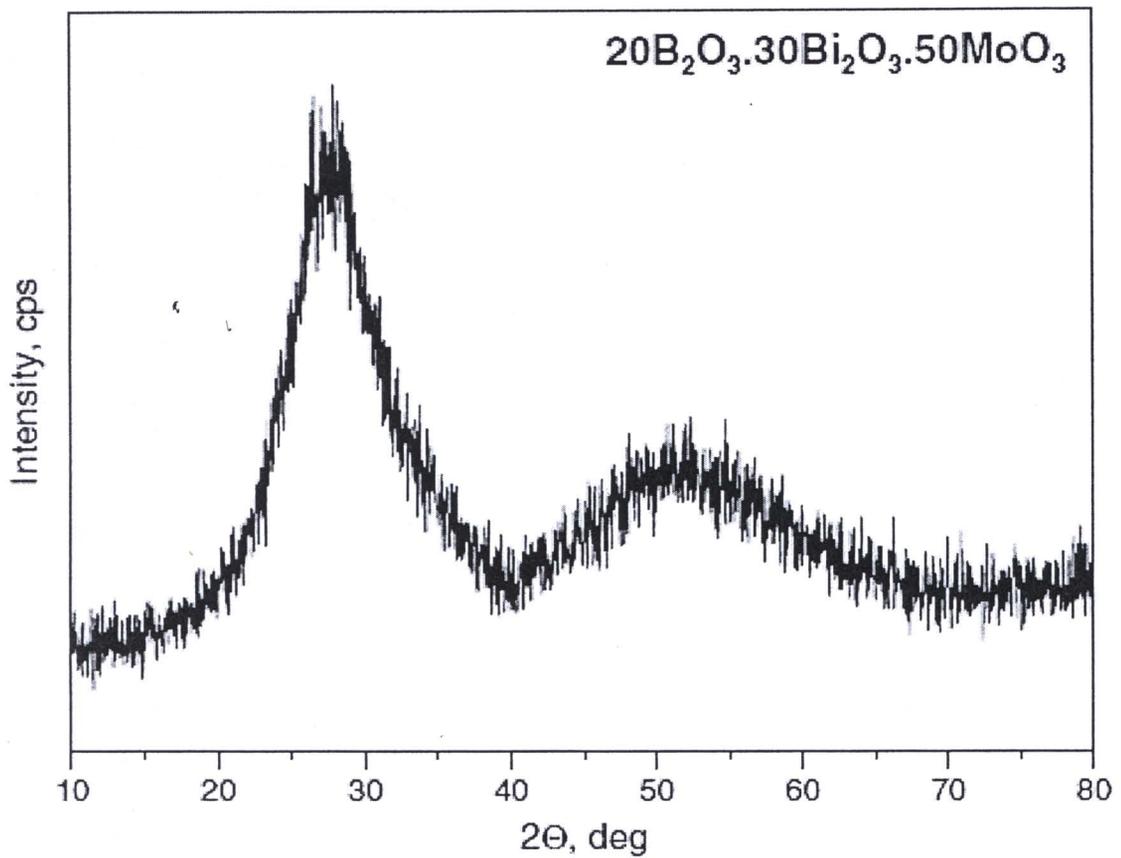
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริกกับปริมาณเหล็กออกไซด์ [21]

ปี ค.ศ. 2009 P. Pascuta และคณะ [22] ได้เตรียมแก้ว  $2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  ที่เจือ  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  0-25 mol% ทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงขึ้นรูปบนแผ่นสแตนเลส นำไปศึกษาโครงสร้างด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ก่อนอบ ซึ่งได้พบดังรูปที่ 2.23(a) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ศึกษาโครงสร้างโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ได้พบดังรูปที่ 2.23(b) จะเห็นว่าในตัวอย่างก่อนอบแก้วจะมีลักษณะเป็นสัณฐานที่มีผลึกปนอยู่ แต่เมื่อนำไปอบจะพบว่าแก้วกลายเป็นผลึกทั้งหมด



รูปที่ 2.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแก้ว  $2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  (a) ก่อนอบ (b) หลังอบ

ปี ค.ศ. 2011 R. Jordanova และคณะ [23] ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างของแก้ว  $40\text{B}_2\text{O}_3$ - $10\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $50\text{MoO}_3$  ที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วกดด้วยแผ่นทองแดง ปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบการเกิดผลึกปนอยู่ในโครงสร้างของแก้ว ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 x-ray pattern ของแก้ว  $40\text{B}_2\text{O}_3$ - $10\text{Bi}_2\text{O}_3$ - $50\text{MoO}_3$  [23]