บทที่ ๒
สมบัติและชนิดของแก้ว

ความหมายของแก้ว จาก Webster's dictionary กล่าวว่า A hard, brittle, translucent, and commonly transparent substance, white or colored, having a conchoidal fracture, and made by fusing together sand or silica with lime, potash, soda, or lead oxide. It is used for window panes and mirrors, for articles of table and culinary use, for lenses, and various articles of ornament. " **แก้ว เป็นสารที่แข็ง, เปราะ, โปร่งแสง ที่มีรอยร้าวและทำได้โดยการหลอมทรายหรือซิลิกา กับ หินปูน, โปรแตส, โซดา หรือตะกั่วออกไซด์ สำหรับทำกระจกหน้าต่าง เครื่องครัว เลนส์และเครื่องประดับ**" นักเคมีอาจอธิบายความหมายของแก้วว่าเป็น "super-cooled liquid" กล่าวคือ**แก้ว เป็นของแข็งที่เกิดจากการที่แก้วในสถานะของเหลวเกิดการเย็นตัวอย่างยวดยิ่ง โดยเป็นของแข็งที่ไม่เกิดผลึกแต่อย่างใด** และด้วยจุดนี้เองแก้วจึงมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นนอน โดยทั่วไปแก้วจะอ่อนตัวที่ช่วงอุณหภูมิค่อนข้างกว้าง และพบว่าสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารประกอบต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก้วนั้น

2.1 สมบัติของแก้ว

เมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมีของแก้ว จะกำหนดนิยามได้ว่า "แก้ว เป็นของผสมที่เกิดจากการรวมตัวของออกไซด์ของสารอนินทรีย์ที่ไม่ระเหย ส่วนประกอบเหล่านี้ได้จากการหลอม และแยกสลายสารประกอบอัลคาไลน์ (Alkali) และ อัลคาไลน์เออร์ธ (Alkali earth), ทราย และสารอื่นๆ แก้วเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบไร้ระเบียบโดยสิ้นเชิง (Completely vitrified) หรืออาจมีบางส่วนที่มีโครงสร้างเป็นระเบียบแบบผลึก แต่จะต้องมีอยู่น้อยมาก" แต่หากทิ้งไว้เป็นระยะเวลานานมากๆ (อาจเป็นเวลาหลายล้านปี) โครงสร้างภายในของแก้วจะ

ค่อยๆ เปลี่ยนจนกระทั่งมีการจัดเรียงที่เป็นระเบียบแบบผลึก และจะหมดสมบัติที่เรียกว่า แก้ว อีกต่อไป สสารประเภทนี้จึงมักจะกล่าวว่าอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state)

นิยามของแก้วเมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพจะกล่าวได้ว่า "แก้วเป็นของเหลวที่ถูกทำให้เย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่แก้วควรจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งได้ โดยที่แก้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นผลึกแต่อย่างใด ของเหลวนี้จึงมีความแข็ง มีความหนืดสูงมากจนกระทั่งโมเลกุลหรืออิออนไม่สามารถจัดเรียงตัวเองแบบผลึก และแก้วมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นอน อันเนื่องมาจากส่วนประกอบที่ไม่เป็นหนึ่งเดียวในเนื้อแก้วนั่นเอง"

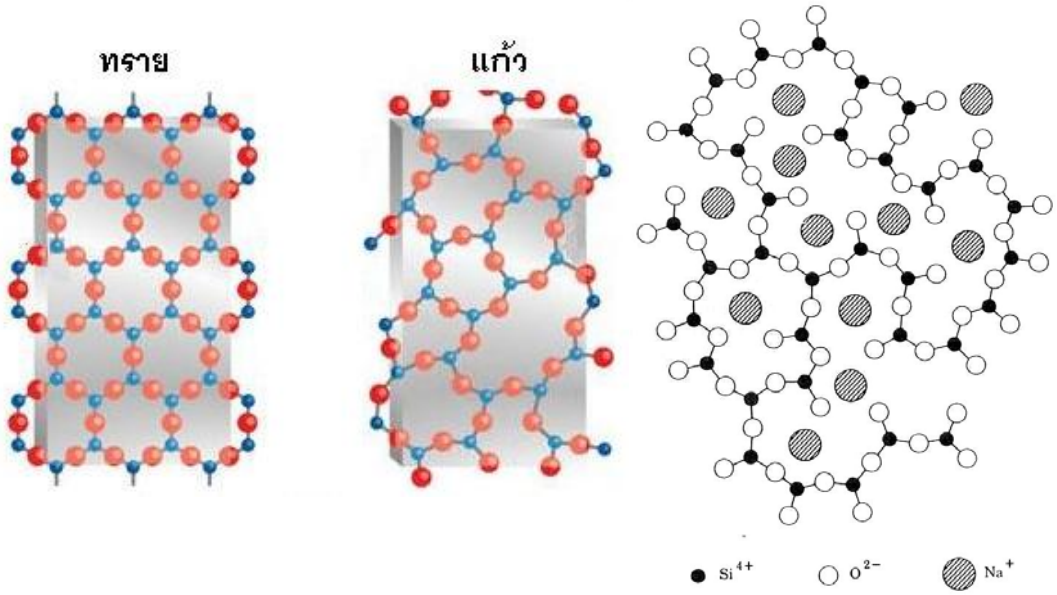
และเมื่อพิจารณาสมบัติทางฟิสิกส์ของแก้ว แก้ว จะหมายถึง "ของเหลวที่เกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด (Supercooled) โดยมีความหนืดสูงจนกระทั่งมีลักษณะภายนอกคล้ายของแข็ง" และสิ่งนี้เองที่เป็นเหตุผลที่ว่าแก้วสามารถเกิดหรือเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกได้ในระยะเวลาที่ยาวนานมาก ๆ

การที่แก้วมีโครงสร้างภายในแบบไร้ระเบียบ จึงทำให้แก้วที่จุดต่างๆ มีพลังงานพันธะ (Bond energy) ไม่เท่ากัน ไม่ว่าจะเป็นแต่ละแถว แต่ละระนาบหรือแต่ละอิออน แก้วจึงมีจุดหลอมตัวที่ไม่แน่นอน เมื่อแก้วหรือวัสดุประเภทเดียวกันนี้ได้รับความร้อนสูงพอ จะค่อยๆ อ่อนแข็งตัวและเปลี่ยนเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นไปอีก ปรากฏการณ์นี้ต่างจากของแข็งที่เป็นผลึกซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเกิดที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งเรียกว่า **จุดหลอมเหลว** (Melting point)

เมื่อแก้วเหลวถูกทำให้เย็นลง จะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งในที่สุดโมเลกุล หรืออิออน สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก จึงมีลักษณะที่แน่นอนและมีลักษณะปรากฏเป็นของแข็ง ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิกว้าง จึงอาจกล่าวได้ว่า *"แก้ว ไม่มีจุดหลอมเหลว"*

แก้วทุกชนิดสามารถทำให้เกิดเป็นผลึกได้เช่นกัน หากการเย็นตัวของแก้วเหลวเป็นไปด้วยอัตราเร็วและภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม การลดอุณหภูมิของแก้วเหลวลงอย่างช้า ๆ จนถึงจุดหลอมเหลว (Melting point) จะทำให้แก้วเกิดผลึกได้ ถ้าควบคุมอุณหภูมิได้ดีพอในลักษณะที่อัตราการเกิดผลึกและการเจริญของผลึกมีค่าสูงกว่าอัตราการเย็นตัวหรือการลดอุณหภูมิของแก้ว แต่โดยทั่วไปแก้วจะต้องไม่มีผลึกหรือมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นในการปฏิบัติจึงต้องให้แก้วเย็นตัวลงเร็วกว่าการเกิดผลึก ปกติจุดที่มีอัตราการเจริญของผลึกสูงสุด (Maximum crystal

growth rate) จะอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย บริเวณดังกล่าวนี้แก้วมีความหนืดสูงกว่าความหนืดของเกลือแกงบริเวณจุดหลอมเหลว ประมาณ 10^8 เท่า การลดอุณหภูมิลงเร็วจึงทำให้แก้วแทบจะไม่มีโอกาสจัดตัวเองให้เป็นระเบียบหรือเกิดผลึกเลย



รูป 2.1 แสดงโครงสร้างของซิลิกา (SiO_2) ในลักษณะผลึก และเมื่อเป็นแก้ว

แก้วทุกชนิดสามารถทำให้เกิดเป็นผลึกได้เช่นกัน หากการเย็นตัวของแก้วเหลวเป็นไปด้วยอัตราเร็วและภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม การลดอุณหภูมิของแก้วเหลวลงอย่างช้า ๆ จนถึงจุดหลอมเหลว (Melting point) จะทำให้แก้วเกิดผลึกได้ ถ้าควบคุมอุณหภูมิได้ดีพอในลักษณะที่อัตราการเกิดผลึกและการเจริญของผลึกมีค่าสูงกว่าอัตราการเย็นตัวหรือการลดอุณหภูมิของแก้ว แต่โดยทั่วไปแก้วจะต้องไม่มีผลึกหรือมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นในการปฏิบัติจึงต้องให้แก้วเย็นตัวลงเร็วกว่าการเกิดผลึก ปกติจุดที่มีอัตราการเจริญของผลึกสูงสุด (Maximum crystal growth rate) จะอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย บริเวณดังกล่าวนี้แก้วมีความหนืดสูงกว่าความหนืดของเกลือแกงบริเวณจุดหลอมเหลว ประมาณ 10^8 เท่า การลดอุณหภูมิลงเร็วจึงทำให้แก้วแทบจะไม่มีโอกาสจัดตัวเองให้เป็นระเบียบหรือเกิดผลึกเลย

2.2 ชนิดของแก้ว

ในปัจจุบันมีแก้วชนิดต่างๆ มากมายหลายร้อยชนิด แต่องค์ประกอบหลักของแก้ว ก็ยังคงเป็นปูนดิบ (Lime, CaO), ซิลิก้า (SiO_2) และโซดา (Na_2O หรือ Na_2CO_3) ซึ่งรวมกันอยู่ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก ซึ่งแก้วแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบหลักในสัดส่วนต่าง ๆ กันไป และส่วนมากจะเป็นการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบรอง (Minor constituents) ซึ่งมีความสำคัญต่อสมบัติของแก้วมาก อย่างไรก็ตามเราอาจจำแนก ชนิดหรือประเภทของแก้วออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ แก้วทางการค้า (Commercial glass) และแก้วพิเศษ (Special glass)

2.2.1 แก้วทางการค้า (Commercial glass)

แก้วที่ผลิตขึ้นเพื่อการค้า ใช้ในงานทั่ว ๆ ไป แก้วทางการค้ามีอยู่หลายชนิด แต่ละชนิดจะบอกส่วนประกอบและสมบัติอย่างคร่าว ๆ โดยมักแสดงร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบหลักเท่านั้น สมบัติของแก้วชนิดนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่แน่นอนของแก้ว และสมบัติจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบย่อย ตัวอย่างเช่น ปกติแก้วไม่มีสมบัติในการนำฟ้า แต่แก้วที่มีโซเดียมเป็นองค์ประกอบจะนำไฟฟ้าได้เป็นต้น แก้วที่จัดอยู่ในพวกแก้วทางการค้านี้ ได้แก่

2.2.1.1 แก้วควอทซ์ (Fused-quartz glass)

แก้วควอทซ์ หรือบางทีเรียกว่า **แก้วซิลิกาบริสุทธิ์** (Pure silica glass) แก้วชนิดนี้ประกอบด้วย

ซิลิกา (SiO_2) *99.5%*

สมบัติของแก้วชนิดนี้ได้แก่ มีความแข็งแกร่ง, มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ, มีความต้านทานต่อสารเคมีและไฟฟ้าสูงแม้ในขณะร้อน แก้วชนิดนี้จะโปร่งแสงสำหรับช่วงความยาวคลื่นค่อนข้างกว้างในสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic spectrum) และโปร่งใสกล่าวคือคลื่นแสงสามารถทะลุผ่านไปได้ ข้อเสียของแก้วชนิดนี้คือ การผลิตแก้วนี้ต้องใช้อุณหภูมิสูงมาก แม้ว่าสามารถผลิตได้จากการไฮโดรไลซีสของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ ($SiCl_4$) แต่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง ทำให้แก้วชนิดนี้มีราคาแพง

แก้วควอทซ์ ใช้ประโยชน์ในการทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีได้ดีเป็นพิเศษ และใช้กับการทดลองที่อุณหภูมิสูง ๆ, ใช้เป็นวัสดุสะท้อนแสงเลเซอร์, ใช้ทำถ้วยกรูซิเบิ้ล (Crucible) สำหรับผลิตผลึกเดี่ยวของซิลิกาบริสุทธิ์เพื่อใช้ในทางอีเล็กทรอนิคส์, ใช้เป็นตัวกลางกรองสิ่งเจือปนในก๊าซไฮโดรเจนและฮีเลียม และนอกจากนี้การที่มีน้ำหนักเบา แต่แข็งแกร่งทนทาน จึงใช้ทำกระจกสำหรับกล้องโทรทรรศน์และดาวเทียม

2.2.1.2 แก้วไวคอร์ (Vycor glass)

แก้วไวอคอร์ มีชื่ออีกอย่างว่า **แก้วซิลิกา 96%** ประกอบด้วย

ซิลิก้า (SiO_2)	*96%*
โบรอนออกไซด์ (B_2O_3)	*3-4%*

แก้วชนิดนี้มีสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ, ต้านทานความร้อนได้ดีและต้านทานต่อสารเคมีได้ดีอีกด้วย แก้วชนิดนี้มีจุดอ่อนตัวค่อนข้างสูงคือ 1500^0C และจุดแอนนีลที่ 910^0C ประโยชน์ของแก้วชนิดนี้ ใช้ทำเป็นเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางเคมีโดยเฉพาะสำหรับการทดลองที่อุณหภูมิสูง ข้อเสียของแก้วชนิดคือมีราคาแพง โดยมีราคาแพงกว่าแก้วแข็งทั่วไป เช่น แก้วโบโรซิลิเกต เป็นต้น

2.2.1.3 แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

แก้วโบโรซิลิเกต บางทีเรียกว่า **แก้วแข็ง** หรือมีชื่อทางการค้าหลายชื่อ เช่น *ไพเร็กซ์ (Pyrex)* ของบริษัท Corning และ *คิมแมกซ์ (Kimax)* ของบริษัท Kimble เป็นต้น แก้วโบโรซิลิเกตจะประกอบด้วย

ซิลิก้า (SiO_2)	*60-80%*
โบรอนออกไซด์ (B_2O_3)	*10-25%*
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	*1-4%*

แก้วชนิดนี้ไม่มีปูนดิบ (Limes ; CaO) อยู่เลย, มีโซดา (Na_2O หรือ Na_2CO_3) และ/หรือโปแตส (K_2O) เพียงเล็กน้อย แต่แก้วนี้มีโบรอนออกไซด์ (B_2O_3) อยู่ประมาณ 12% โดยเฉลี่ย ซึ่งทำให้เนื้อแก้วมีความแข็ง ทนทานต่อความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกระทันหันได้ดี มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นต่ำ ทำให้ภาชนะที่ทำจากแก้วชนิดนี้มีสมบัติต้านทานต่อความ

ร้อนและสารเคมี แก้วชนิดนี้ใช้ประโยชน์ในการทำเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทางเคมี, ทำเทอร์โมมิเตอร์วัดที่อุณหภูมิสูง, ทำเลนส์ของกล้องโทรทรรศน์, ทำเครื่องครัวหรือภาชนะหุงต้มอาหารที่ทนทานต่อความร้อน และทำระบบท่อในอุตสาหกรรม เป็นต้น

2.2.1.4 แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate glass)

แก้วอลูมิโนซิลิเกต ประกอบด้วย

ซิลิก้า (SiO_2)	*5-60%*
อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	*20-40%*
ปูนดิบ หรือ ไลม์ (lime ; CaO)	*5-50%*
โบรอนออกไซด์ (B_2O_3)	*0-10%*

เป็นแก้วที่สามารถต้านทานต่อสารเคมีและไฟฟ้าได้ดีแม้แต่ที่อุณหภูมิสูง ,มีการขยายตัวเชิงเส้นสูงเมื่อได้รับความร้อน ในด้านการนำไปใช้คล้ายกันกับแก้วโบโรซิลิเกต แต่มีข้อดีกว่าที่สามารถต้านทานต่อสารเคมีได้ดีกว่า ประโยชน์ของแก้วชนิดนี้ใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์, ทำหลอดสูญญากาศทางอิเล็กทรอนิกส์, ทำเครื่องครัว, ทำ Combustion tube เป็นต้น

2.2.1.5 แก้วอ่อน (Soft glass)

แก้วอ่อน หรือบางทีเรียกว่า **แก้วโซดา** (Soda glass) หรือแก้วไลม์ (Lime glass) ประกอบด้วย

ซิลิก้า (SiO_2)	*70%*
โซดา (Na_2O)	*15%*
ปูนดิบ หรือ ไลม์ (Lime; CaO)	*10%*

การผลิตแก้วชนิดนี้เกิดจากการพบว่า เมื่อเติมโซดา (Na_2O หรือ Na_2CO_3) หรือโปแตส (K_2O) ลงในซิลิกาจะช่วยทำให้จุดอ่อนตัวของซิลิกาลดต่ำลงประมาณ 800 ถึง 900^{0}C แต่มีข้อเสียที่แก้วนี้ไม่ค่อยทนทานต่อสารเคมี แต่ต่อมาพบว่าการเติมไลม์หรือปูนดิบ (CaO) หรือแมกนีเซียม (MgO) หรืออลูมินา (Al_2O_3) จะช่วยทำให้แก้วที่ได้ มีความทนทานต่อสารเคมีได้ดีขึ้น และยังช่วยให้ผิวแก้วมีความแข็งเพิ่มขึ้น ทำให้ทนทานต่อการขูดขีด แก้วชนิดนี้นิยมใช้กันมากทั้งที่เป็นแผ่น (Sheet glass), แท่งแก้วกลวงหรือหลอดแก้ว (Glass tubing) และแท่งแก้วตัน (Glass rod)

สมบัติของแก้วชนิดนี้คือ มีความต้านทานต่อความร้อนและสารเคมีได้น้อย เมื่อเทียบกับแก้วทางการค้าอื่น ๆ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้นสูงมาก (ประมาณ 3 เท่าของ Borocilicate glass) และมีความยากต่อการแอนนีล ประโยชน์ของแก้วชนิดนี้ใช้ทำขวดต่าง ๆ ทำแผ่นกระจกหน้าต่างและใช้ทำโคมตะเกียง เป็นต้น

2.2.1.6 แก้วตะกั่ว (Lead glass)

แก้วตะกั่ว หรือบางครั้งเรียกว่า **ฟลิ้นท์กลาส** (Flint glass) ประกอบด้วย

ซิลิก้า (SiO_2)	*30-70%*
ตะกั่วออกไซด์ (PbO)	*18-65%*
Na_2O และ/หรือ K_2O	*5-20%*

แก้วชนิดนี้ผสมตะกั่วออกไซด์ ทำให้จุดอ่อนตัวต่ำกว่าแก้วโซดา แต่ยังช่วยทำให้แก้วมีดัชนีหักเหแสง (Refractive index) สูงขึ้น และมีกำลังในการกระจายแสง (Dispersion power) สูงขึ้นด้วย แก้วชนิดนี้จัดเป็นแก้วอ่อนชนิดหนึ่ง และมีสมบัติที่ดีคือสามารถงอ (Bend) ได้มากกว่าแก้วชนิดอื่น ๆ และใช้ต่อเชื่อมกับโลหะได้ดี ประโยชน์ของแก้วชนิดนี้ใช้ทำหลอดแก้วเทอร์โมมิเตอร์, หลอดไฟฟ้า และหลอดนีออนป้ายโฆษณา เป็นต้น เนื่องจากแก้วตะกั่วมีดัชนีหักเหแสง และมีกำลังในการกระจายแสงสูง ทำให้เนื้อแก้วมีความแวววาวจึงนิยมนำแก้วตะกั่วมาทำเป็นแก้วเจียระไน (Crystal glass) เป็นภาชนะในครัวเรือนและเครื่องประดับ เครื่องตกแต่งบ้านเรือนที่สวยงามต่าง ๆ มากมาย

นอกจากความแตกต่างในด้านองค์ประกอบ และประโยชน์ของแก้วทางการค้าแต่ละชนิดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีสมบัติทางกายภาพบางประการของแก้วทางการค้าบางชนิดที่ช่างเป่าแก้วควรจะต้องทราบ ก็คือ อุณหภูมิที่แก้วเริ่มอ่อนตัว ที่เรียกว่า **จุดอ่อนตัว** (Softening point), อุณหภูมิขณะทำการเป่าแก้ว ที่เรียกว่า **จุดการทำงาน** (Working point) และอุณหภูมิที่จะต้องควบคุมให้คงที่ ก่อนที่จะทำให้แก้วเย็นตัวลงเพื่อให้เนื้อแก้วไม่แตกร้าว ที่เรียกว่า **จุดแอนนีล** (Annealing point) ดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติทางกายภาพบางประการของแก้วทางการค้าบางชนิด

ชนิดของแก้ว	จุดอ่อนตัว (^{0}C)	จุดการทำงาน (^{0}C)	จุดแอนนีล (^{0}C)
แก้วควอทซ์ (Fused-quartz glass)	1,650	1,850-2,100	1,200
แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass)	820	1,220	555
แก้วอ่อน ,แก้วโซดา (Soft glass)	700	1,000	510
แก้วตะกั่ว (Lead glass)	626	970	425

2.2.2 แก้วพิเศษ (Special glasses)

แก้วพิเศษ เป็นแก้วที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ในงานเฉพาะหรือวัตถุประสงค์เฉพาะเท่านั้น โดยมีส่วนผสมต่างไปจากแก้วทางการค้า ส่วนมากจะเป็นการเติมสารองค์ประกอบพิเศษลงไปในส่วนผสมของแก้ว ซึ่งจะทำให้แก้วที่ผลิตได้มีสมบัติทางกายภาพ, ทางแสง หรือเคมีเปลี่ยนไป แก้วในกลุ่มนี้มีมากมายหลายชนิด แต่ในที่นี้จะกล่าวเพียงบางชนิดที่มีการใช้งานโดยทั่วไป ดังนี้

2.2.2.1 แก้วสี (Colored glass)

มนุษย์รู้จักวิธีการผลิตแก้วให้มีสีต่างๆ กัน และ ได้รับความนิยมมาตั้งแต่อดีต ส่วนมากนิยมใช้ในงานตกแต่ง แต่ในปัจจุบันมีการใช้งานแก้วสีโปร่งใส (Colored transparent glasses) อย่างกว้างขวาง เพื่อจุดมุ่งหมายทางด้านงานเทคนิค และทางวิทยาศาสตร์ แก้วสามารถผลิตให้มีสีต่าง ๆ กันได้ (ตาราง 2.2) เนื่องจากการเกิดสีของแก้วมีหลายสาเหตุดังนี้

ตาราง 2.2 สารที่ทำให้แก้วมีสีต่าง ๆ กัน

สารที่ทำให้เกิดสี	สีของแก้ว
Arsenic + Lead oxide	white opal
Cadmium selenide	bright red and orange
Cadmium sulfide	Yellow
Cerinuim oxide + Titanium oxide	Yellow
Chomium oxide (exess)	ตกผลึกให้ sangled or aventuring glass
Chromium oxide	yellow–green, green
Cobalt oxide	Blue
Colloial copper	Ruby
Colloial gold	Ruby
Copper oxide	green, blue
Copper, Cobalt, Nickel and Iron Oxide in combinations of Two or mores	Black
Copper[I] oxide	Red
Didymium	lilac red , green [UV.filters]
Iron chromite	blue – green
Iron oxide	blue, green, amber
Iron sulfide	Amber
Manganese oxide	Amber
Manganese oxide + Iron oxide	pink, deep purple, black
Neodymium oxide	Purple
Nickel oxide + Cobalt oxide	brown, purple, deep blue
Nickel oxide + Titanium oxide	Gray
Phosphoric acid	white opal, promotes U.V. transparency
Phosphoric acid + Ferrous compounds	opacity to I.R.
Selenium	pink, red, red – brown
Silver	Yellow
Sulfur	Amber
Sulfur with lead, Iron, Nickel or Cobalt	deep black

ก) สีเกิดจากการดูดกลืนแสงของสารที่ทำให้เกิดสี (Coloring agent) ที่อยู่ในเนื้อแก้ว การดูดกลืนแสงช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่งของแก้วขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีสารที่ทำให้เกิดสี ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชั่น โดยเฉพาะโลหะแถวแรก เช่น Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni และ Cu สีของออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การเกิดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทางเคมีของโครงสร้างของเนื้อแก้ว เช่น NiO ในแก้วโซเดียม-ตะกั่วจะให้สีน้ำตาล แต่ในแก้วโปแตสเซียม-ตะกั่วจะให้สีม่วงแดง (Reddish-purple หรือ Heliotrope)

- การเกิดสีเนื่องจากออกซิเดชันสเตตของโลหะอิออน เช่นออกไซด์ของโครเมียม จะมีสีต่าง ๆ กัน จากสีเขียว ถึงสีส้ม เมื่อ Cr มีออกซิเดชันสเตท +3 ถึง +6 การที่โลหะจะมีออกซิเดชันสเตทเท่าใดก็ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของออกไซด์เบส (Cr_2O_3) ต่อ ออกไซด์กรดในเนื้อแก้ว และขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเนื้อแก้วว่าจะมีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบส

ข) สีเกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ที่ตกค้างอยู่ในเนื้อแก้ว โดยที่แก้วจะไม่มีสี แต่เมื่อผ่านขั้นตอนการดำเนินงานทางความร้อนจะทำให้เกิดสีขึ้นได้ เช่น คอลลอยด์ของทองคำ ทำให้แก้วมีสีแดงทับทิม เรียกว่า Gold ruby glass

ค) สีเกิดจากหักเหหรือสะท้อนแสงของอนุภาคขนาดเล็ก (Microscopic particles) หรือโตกว่าอนุภาคระดับโมเลกุล ที่อยู่ในเนื้อแก้ว เช่น สีแดงซิลิเนียม ซึ่งเกิดจากอนุภาคเล็ก ๆ ของ Selenium oxide (SeO_2) ใช้ทำกระจกไฟสัญญาณจราจร, ทำกระจกครอบโคมเป็นต้น หรืออนุภาคเหล่านี้อาจไม่สี แต่สามารถหักเหหรือสะท้อนแสงช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่งได้ดีเป็นพิเศษ ทำให้เกิดสีคล้ายพวกโอปอล (Opal) ซึ่งเป็น Hydrated amorphous silica , ($SiO_2.nH_2O$) เดิมอาจมีสีขาวขุ่น (Translucent milky) หรือสีต่าง ๆ เมื่อหักเหแสง หรือสะท้อนแสงจะทำให้สีต่างไป

2.2.2.2 แก้วโอปอลหรือแก้วโปร่งแสง (Opal or Translucent glass)

แก้วประเภทนี้เมื่อหลอมเป็นแก้วเหลวจะมีลักษณะใส แต่เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นขณะขึ้นรูป จะกลับไปอยู่ในสภาพแข็ง เนื้อแก้วจะเริ่มขุ่น อนุภาคเล็ก ๆ ที่แขวนลอยในเนื้อแก้วจะเกิดการกระจายแสง (Diffuse) ทำให้แสงที่ทะลุผ่านหรือที่สะท้อนไม่เจิดจ้า มีสีนวลเย็นตา เนื่องจากเกิดการแยกตัวของส่วนประกอบบางส่วน และเกิดการแขวนลอย (Suspension) อยู่ใน

เนื้อแก้ว แก้วโอปอลจึงถูกนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ใช้ทำเป็นเครื่องประดับ, ใช้ทำเป็นตัวกลางกระจายแสงเพื่อการส่องสว่างในอุปกรณ์หรือภาชนะบรรจุต่าง ๆ ในวัสดุก่อสร้าง แก้วโอปอลมักมี ฟลูออไรด์ (Fluoride) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะต้องมีกรรมวิธีการผลิตแบบพิเศษ เพื่อให้ได้ผลตามต้องการ

2.2.2.3 แก้วนิรภัยหรือแก้วลามิเนต (Safety glass or Laminated glass)

แก้วนิรภัย ใช้งานมากในการทำกระจกหน้าต่างสำหรับรถยนต์ แก้วประเภทนี้เมื่อได้รับแรงกระแทกภายนอกมากพอ จะเกิดการแตกและลุกลามไปทั่วทั้งแผ่นโดยชิ้นส่วนที่แตกจะมีขนาดเล็กและไม่มีขอบคมแต่อย่างใด แก้วชนิดนี้ผลิตโดยทำให้แข็งเป็นพิเศษ (Casehardened) นอกจากนี้มีแก้วนิรภัยอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่า แก้วลามิเนต ซึ่งจะเป็นแก้วที่มีลักษณะเป็น 2 ชั้นสอดไส้กลางด้วยพลาสติก หรือ โพลิไวนิลบิวเทอรอลเรซิน (Poly vinyl butyral resin) เมื่อแก้วแตกจะไม่กระจายออกไป แต่จะยังคงติดเป็นแผ่นอยู่ได้อันเนื่องจากแผ่นพลาสติกที่สอดไส้ไว้นั่นเอง แต่เดิมแก้วประเภทนี้ใช้ตาข่ายลวดสอดไส้ไว้ ต่อเมื่อพลาสติกมีราคาถูกและมีความโปรงใสกว่า จึงหันมานิยมใช้พลาสติกแทน ซึ่งทำได้ง่ายและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า

2.2.2.4 เส้นใยแก้ว (Fiber glass)

เส้นใยแก้ว มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.00002 ถึง 0.00005 นิ้ว เป็นพวกที่ปั่นให้เป็นเส้นใย (Glass wool) หรือนำมาถักทอเป็นผืน แก้วประเภทนี้มีการผลิตมานานแล้ว มีประโยชน์และการใช้งานมาก นำมาปั่นรวมกันเป็นเส้นใยที่มีขนาดโตขึ้น นำมาทอเป็นผืน ทำเป็นฉนวนความร้อนและไฟฟ้า ทำเป็นแผ่นแถบยาว ทำที่กรองอากาศ ทำเป็นท่อโดยทำให้เกิดลักษณะพลาสติก นอกจากนี้ใช้ผสมเนื้อพลาสติกทำอุปกรณ์เครื่องใช้ เครื่องกีฬาและอื่น ๆ

2.2.2.5 แก้วไวแสง (Photosensitive glass)

ในปี ค.ศ. 1974 บริษัทคอร์นนิง ได้ผลิตแก้วไวแสงขึ้น ซึ่งสามารถพิมพ์รูปสี 3 มิติในเนื้อแก้วได้ โดยทำให้ภาชนะหรืออุปกรณ์แก้วที่ทำจากแก้วไวแสงนี้มีรูป 3 มิติอยู่ภายในเนื้อแก้ว แก้วประเภทนี้ผู้ผลิตจะเติมโลหะไวแสง (Photosensitive metals) เช่น ทอง, เงิน, ทองแดง และ ตัวกระตุ้น (Sensitizes) ซึ่งอาจเป็นประเภทที่เกิดการรีดิวซ์เมื่อได้รับความร้อน (Thermo reducing) หรือ ทำงานด้วยพลังงานแสง (Optically active) ก็ได้ ลงไปในเนื้อแก้วปกติ ซึ่งจะต้องมีออกไซด์ของโลหะอัลคาไลเป็นส่วนประกอบไม่น้อยกว่า 5 % โดยน้ำหนัก ตัวกระตุ้นที่นิยมใช้กันมากคือ Optical sensitize cerium ซึ่งสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยแสงทุกช่วงคลื่นจึงทำให้เกิดสีได้แทบทุกสี ส่วนผสมของแก้วที่หลอมแล้ว จะนำไปขึ้นรูปตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปพิมพ์ภาพหรือสร้างภาพโดยการใช้แผ่นฟิล์มเนกาตีฟของภาพที่ถ่ายไว้มาวางทาบบนผิวแก้ว แผ่นฟิล์มเนกาตีฟนี้เป็นเนกาตีฟขาว-ดำ จากนั้นนำไปฉายด้วยแสงเหนือม่วง เช่น สีส้ม และแดงเป็นลักษณะของการถูกแสงมาก (ซึ่งจะเป็นส่วนที่ใสบนแผ่นฟิล์มเนกาตีฟ) และจะเกิดได้เร็วกว่าสีม่วงและน้ำเงิน ภาพสีจะเกิดขึ้นเมื่อนำแก้วที่ฉายแสงแล้วนี้ไปเผาจนถึงอุณหภูมิแอนนิล (Annealing temperature) หรือสูงกว่า ภาพที่ปรากฏอยู่ในเนื้อแก้วนี้ มีความทนทานต่อการขัดถู ทนต่อความร้อน ความชื้นและฝุ่นละออง ภาพพิมพ์ไม่ซีดจางเมื่อทิ้งไว้นาน ๆ อนึ่ง ส่วนที่เป็นภาพอาจละลายออกจากเนื้อแก้วได้โดยการจุ่มแช่ลงในสารเคมีที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ได้ภาพ 3 มิติ ที่ไม่มีสีปรากฏบนแก้วเหมือนหนึ่งการแกะสลักลายนูนบนเนื้อแก้วใสนั้นเอง

2.2.2.6 แก้วฟอสเฟต (Phosphate glass)

แก้วฟอสเฟต เป็นแก้วที่มีฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) เป็นส่วนผสมด้วย โดยทั่วไปจะลดซิลิกาลงบางส่วนหรือทั้งหมด ทำให้แก้วมี P_2O_5 เป็นองค์ประกอบหลัก แก้วประเภทนี้มีสมบัติทนต่อกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งปกติเป็นสารเคมีที่สามารถละลายซิลิกา หรือกัดกร่อนแก้วได้ แก้วประเภทนี้จึงมีที่ใช้ประโยชน์ในงานที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก เช่น ในกระบวนการเติมฟลูออรีนเข้าไปในโมเลกุลสารอินทรีย์ (Fluorination), ใช้ทำหน้าต่างสำหรับดูในอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานหรือในการขนย้ายสารยูเรเนียมที่แยกได้ไปใช้ในงานทางนิวเคลียร์ เช่น ระเบิดปรมาณู เป็นต้น นอกจากนี้การเติมออกไซด์ของฟอสฟอรัสลงไปนี้ช่วยให้แก้วไม่ดูดกลืนแสงเหนือม่วง หรือมีการดูดกลืนน้อยที่สุด จึงใช้ทำแก้วอุลตราไวโอเลต

(Ultraviolet glass) นอกจากนี้ใช้กับพวกแก้วทางแสงชนิดพิเศษ แก้วดูดกลืนความร้อน (กันความร้อน) และแก้ว ฟลูออเรสเซนต์ เป็นต้น

นอกจากแก้วพิเศษต่างๆ ที่กล่าวมาทั้ง 6 ชนิด นี้ยังมีแก้วชนิดพิเศษที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในงานเฉพาะอย่างมากมาย เช่น

- แก้วที่เปลี่ยนสีได้เมื่อถูกแสงที่มีความเข้มต่างๆ กัน ซึ่งนำมาใช้ทำแว่นตากันแดด และแว่นสายตาพร้อมกับเป็นแว่นกันแดดในตัว

- แก้วเซรามิกซ์ (Glass-ceramic) เป็นแก้วที่มีสมบัติทนต่อความร้อนเป็นพิเศษ จึงใช้ทำภาชนะที่ต้องใช้งานที่อุณหภูมิสูงหรือใช้ทำภาชนะอบอาหารในเตาอบ เป็นต้น

แก้วที่ใช้ในงานทางเคมี ในงานทางแสง และอื่น ๆ จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ เนื่องจากเป็นแก้วที่มีการใช้งานเฉพาะเท่านั้น แต่พอจะสรุปได้ว่าเป็นแก้วที่มีการเติมสาร (additive) พิเศษลงไป หรือเป็นแก้วที่ผ่านกรรมวิธีผลิตพิเศษ ตามวิธีการที่ผู้ผลิตคิดค้นขึ้น