

บทที่ 3

การผลิตแก้ว

แม้ว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ จะได้รับการพัฒนาอย่างกว้างขวาง แต่เทคโนโลยีสำหรับการผลิตแก้วมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก การผลิตแก้วในทางอุตสาหกรรมนั้นต้องการผลิตในปริมาณมากจะนิยมใช้กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง เช่น แก้วแผ่นทำหน้าต่าง กระจก ภาชนะบรรจุ ภาชนะเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น โรงงานแก้วที่ทันสมัยใช้ระบบอัตโนมัติในการควบคุม การบรรจุวัตถุดิบเข้าเตาหลอมและการทำแก้วให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ การผลิตแก้วในปริมาณน้อย เช่น แก้วพิเศษต่างๆ ยังคงใช้วิธีการแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) ในโรงงานที่ค่อนข้างล่าสมัยจะดำเนินการโดยใช้แรงงานคน ซึ่งมีปัญหาที่ค่อนข้างอันตรายต่อคนงานคือมีฝุ่นละอองฟุ้งกระจายในโรงงานมาก ฝุ่นนี้จะมีฝุ่นทรายด้วย เนื่องจากทรายมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งหนักกว่าอากาศ และไม่ละลายในของเหลวที่อยู่ในร่างกายสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการหายใจเอาทรายเข้าไปจะทำให้เกิดการตกค้างที่ปอด ซึ่งทำให้เกิดโรคปอดแข็ง หรือที่เรียกว่า ซิลิโคซิส (Silicosis) โดยซิลิกาที่ตกค้างนี้ทำให้ถุงลมที่ปอดขยายตัวได้ไม่เต็มที่จึงลดประสิทธิภาพการหายใจด้วย โรงงานเหล่านี้จึงมักถูกกฎหมายเกี่ยวกับความปลอดภัยในโรงงานบังคับให้ไปใช้ในระบบกลไกการขนส่ง และผสมวัตถุดิบ และดำเนินการในสภาพที่ปิดมิดชิด เพื่อป้องกันอันตรายดังกล่าว

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตแก้วได้แก่ ทรายแก้ว (Glass sand), เถ้าโซดาหรือโซดาแอช (Soda ash, Na_2CO_3), พวงตะกอนเกลือ (Salt cake; Na_2SO_4 ไม่บริสุทธิ์), หินปูน (Limestone, CaCO_3), ไลม์ (Lime, CaO) นอกจากนี้อาจต้องใช้ออกไซด์ของตะกั่ว, perl ash (K_2CO_3), Saltpeter (KNO_3), บอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), กรดบอริก (H_3BO_3), อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As_2O_3), แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar), แร่ฟลูออรัสสปาร์ (Fluorspar), ออกไซด์ของโลหะ, โลหะคาร์บอนหรือเกลืออื่นๆ ที่ใช้ทำแก้วสี เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ผลิตแก้วดังกล่าวส่วนใหญ่จะเป็นวัตถุดิบในประเทศหรือในท้องถิ่น ยกเว้นองค์ประกอบรองบางชนิด และพวกสารเติม (Additives) และ

ยกเว้นการผลิตแก้วที่ต้องการวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งอาจจะต้องนำเข้าจากต่างประเทศ หรือสั่งจากโรงงานผู้ผลิตสารเหล่านั้นโดยตรง

3.1 วัตถุดิบในการผลิตแก้ว

3.1.1 ทราย (Sand)

ทรายที่จะนำมาผลิตแก้ว จะต้องเลือกใช้ชนิดที่มีความบริสุทธิ์สูง เกือบจะเป็นควอตซ์บริสุทธิ์หรือซิลิกอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ทั่วไปจะต้องมีเหล็กไม่เกิน 0.045% โดยน้ำหนัก และในกรณีที่จะผลิตแก้วที่จะนำไปใช้กับงานทางแสงนั้นจะต้องมีเหล็กไม่เกิน 0.015 % โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กจะมีผลต่อสีของแก้วทุกชนิด ซึ่งหากนำไปผลิตแก้วจะต้องใช้ตัวฟอกสีมาก ทำให้เพิ่มต้นทุนการผลิตแล้ว ยังก่อให้เกิดการตกผลึก (Devitrification) ได้ง่าย โดยทั่วไปสิ่งเจือปนในทรายจะมีโลหะอื่นๆ เช่น ไทเทเนียม, เซอร์โคเนียม และโครเมียม ซึ่งสามารถให้สีได้เช่นกัน ทรายที่จะนำมาผลิตจึงอาจต้องกำจัดโลหะอื่นๆ ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้อาจมีสิ่งเจือปนอื่นซึ่งไม่มีผลต่อเนื้อแก้ว แต่ต้องคำนึงถึงในแง่ของส่วนประกอบของเนื้อแก้ว เช่น อลูมินา (Al_2O_3), แคลเซียมคาร์บอเนต, เหล็กแมกนีเซียม, โซเดียม และ โพแทสเซียม เป็นต้น

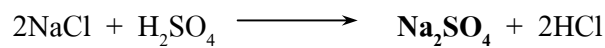
นอกเหนือจากคุณภาพของทรายในทางเคมีแล้ว สมบัติทางกายภาพก็ต้องการคำนึงถึงด้วย เช่น ขนาดของเม็ดทราย หากมีขนาดโตเกินไปจะต้องใช้เวลาในการผลิตนาน หรืออาจจะตกค้างในลักษณะของอนุภาคแขวนลอย แต่หากเม็ดเล็กเกินไปจะหลอมเร็วเกินไป ทำให้เกิดการปล่อยฟองแก๊สเร็วและมาก จะทำให้กำจัดฟองยากและตกค้างในผลิตภัณฑ์ ผู้ผลิตแก้วจึงต้องกำหนดมาตรฐานของขนาดเม็ดทรายด้วยเช่นกัน ทรายแก้วที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตแก้วในประเทศไทยนั้นส่วนมากจะได้จากแหล่ง จังหวัดสงขลา และระยอง

3.1.2 โซดา (Soda, Na_2O)

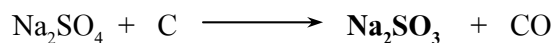
โซดาหรือโซเดียมออกไซด์ จะได้จากวัตถุดิบบางประเภท เช่น เถ้าโซดา (Soda ash, Na_2CO_3), โซดาบั้งขนมปัง (Sodium bicarbonate, $NaHCO_3$), ซอลท์เคก (Salt cake, Na_2SO_4) หรือ โซเดียมไนเตรต ($NaNO_3$)

- โซดาแอซ (Na_2CO_3) ได้จากโรงงานผลิตโซดาแอซ, ผลพลอยได้จากโรงงานอื่น ๆ หรือจากธรรมชาติ เช่น หินโทรนา (Trona, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยทั่วไปโซดาแอซมี 2 ชนิดคือ ชนิดเบา และชนิดหนัก ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1.5 เท่าของชนิดเบา แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมแก้วมักเป็นชนิดหนัก

- ซอลท์เค้ก (Na_2SO_4) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมกรดเกลือที่เกิดจากปฏิกิริยา



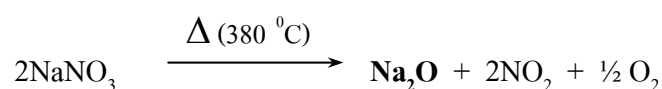
หรือจากโรงงานอื่น ๆ ซึ่งมักจะไม่นับริสุทธิ การใช้ซอลท์เค้กมักต้องเติมผงถ่านควบคู่ไปด้วย เพื่อรีดิวส์ให้เป็นซัลไฟต์ ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ภายใต้ภาวะการหลอมแก้วได้ง่ายกว่า



ปกติจะใช้ปริมาณ Na_2SO_4 ได้ประมาณ 1 ใน 5 ของโซดาแอซ ถ้าแก้วที่ต้องการผลิตมีแคลเซียมออกไซด์สูง แต่หากเป็นแก้วประเภทที่มีแคลเซียมออกไซด์ต่ำ จะใช้ได้ไม่เกิน 1 % ของโลหะอัลคาไลด์ ทั้งหมดในส่วนผสมของแก้วนั้นๆ ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะเกิดการแยกตัวของส่วนที่มากเกินไป กลายเป็นของเหลวที่เรียกว่า น้ำเกลือ (Salt water) หรือ Glass gall และอาจทำให้ผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้มีเม็ด SO_3 มากไปด้วย

การเติมซอลท์เค้กลงไปเล็กน้อยนี้จะช่วยทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่ตกค้าง ที่อุณหภูมิสูงๆ ทำให้ซิลิกาละลายได้หมด ถ้าซิลิกาละลายไม่หมดมักจะรวมตัวกันละลายบนผิวหน้าของแก้วเหลวเรียกว่า scum

- โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) จะช่วยออกซิไดส์เหล็กและเร่งการหลอมตัว นอกจากการให้ Na_2O ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเนื้อแก้ว จึงนิยมเติมในปริมาณที่ไม่มากนัก สารนี้สลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกความร้อน โดยสลายที่อุณหภูมิ 380°C ดังปฏิกิริยา



3.1.3 ไลม์ (Lime, CaO)

ไลม์ หรือ แคลเซียมออกไซด์ จะช่วยทำให้ส่วนผสม $\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$ ไม่ละลายน้ำ นั่นคือ CaO จะเพิ่มความคงทน (Durability) ให้แก่แก้ว นอกจากนี้จะเพิ่มการนำความร้อน อุณหภูมิแอนนีส ความแข็งแรงทางกล ความทนทานต่อความร้อน และเพิ่มความทนทานต่อการเกิดตกผลึกเมื่อทิ้งไว้นาน ๆ (Devitrification) แต่หากมี CaO มากไปจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้วได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วลงด้วย

แหล่งของไลม์ส่วนมากจะได้แก่ หินปูน (Limestone, CaCO_3) นอกจากนี้อาจได้จาก Burnt lime ซึ่งได้จากการนำโดโลไมต์ (Dolomite; $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) มาเผาซึ่งในกรณีนี้จะทำให้มี MgO ในเนื้อแก้ว หรือเพิ่ม MgO ในเนื้อแก้วด้วย นอกจากนี้ยังได้จากแร่ฟลูออสปาร์ (Fluorspar) หรือบางที่เรียกว่า แร่ฟลูออไรต์ (Fluorite; CaF_2) ซึ่งเป็นแร่ที่มีกระจายกระจายแทบจะทั่วประเทศไทย หินปูนในประเทศไทยมีอยู่ในทุกภาคทั่วประเทศ แหล่งที่ใช้ในการผลิตแก้วได้แก่ แหล่งที่จังหวัดราชบุรี หินปูนที่ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วจะต้องมี CaO ไม่น้อยกว่า 55.2% (หรือเทียบได้กับ CaCO_3 ไม่น้อยกว่า 98.5%) มีเหล็กไม่เกิน 0.035% และข้อกำหนดอื่นๆ ทั้งทางเคมีและกายภาพ

3.1.4 เฟลด์สปาร์ (Feldspar)

เฟลด์สปาร์หรือหินฟันม้า มีสูตรทั่วไปเป็น $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ เมื่อ R_2O คือ Na_2O และ/หรือ K_2O แร่นี้มีข้อดีที่เป็นแหล่งของ Al_2O_3 หลอมง่าย และองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นออกไซด์เหมือนกับที่มีในเนื้อแก้ว ปกติแหล่งของอลูมินา (Al_2O_3) นอกจากเฟลด์สปาร์แล้วอาจได้จากการ Calcined ของ alumina หรือ Aluminium hydrate (เป็นสารที่ค่อนข้างบริสุทธิ์ที่ผ่านกรรมวิธีแล้ว จึงมักมีราคาสูงเมื่อเทียบกับเฟลด์สปาร์) ในเนื้อแก้วอาจมีอลูมินาเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี, ความแข็งแรงทางกล, ความหนืด, ช่วงอุณหภูมิที่ทำงานกับแก้วจะกว้างขึ้น, หน่วงการเกิดผลึก (Devitrification) ให้ช้าลง, ลดอุณหภูมิในการแอนนีส, สัมประสิทธิ์การขยายตัว และความหนาแน่นลดลง

เฟลด์สปาร์ นอกจากจะให้ Al_2O_3 แล้วยังเป็นวัตถุดิบที่ให้ออกไซด์ของโลหะอัลคาไลด์ ($\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$) และ ซิลิกา (SiO_2) ด้วย ในปัจจุบันแหล่งผลิตเฟลด์สปาร์ที่สำคัญ

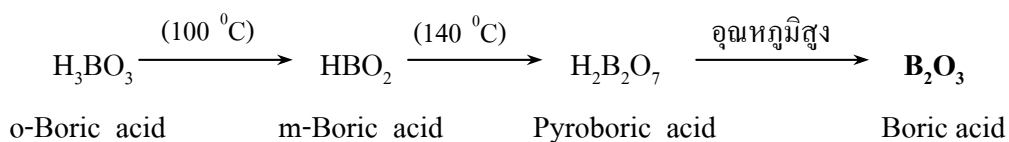
ได้แก่แหล่งที่จังหวัดตาก นอกจากนี้ได้มาจากแหล่งจังหวัดราชบุรี, เชียงใหม่, ลำปาง, แม่ฮ่องสอน, กาญจนบุรี, อุทัยธานี และนครศรีธรรมราช เป็นต้น

3.1.5 บอริกออกไซด์ (Boric oxide, B_2O_3)

บอริกออกไซด์ จัดเป็นองค์ประกอบรอง (Minor ingredient) ปกติจะใช้ในรูปแบบของบอแรกซ์ (Borax, $Na_2B_4O_7$) หรือกรดบอริก (Boric acid, HBO_3) ซึ่งเมื่อมีอุณหภูมิสูงจะสลายตัวให้บอริกออกไซด์ องค์ประกอบนี้ไม่ค่อยใช้ผสมในแก้วที่ใช้ทำแก้วหน้าต่าง (Window glass) หรือแก้วแผ่น (Plate glass) ซึ่งเป็นแก้วที่มีความหนามากกว่าแก้วหน้าต่าง ในปัจจุบันนิยมใช้ทำภาชนะบรรจุ เช่น ขวด เป็นต้น เคยมีการผลิตแก้วที่มีบอเรตสูงทำให้ได้แก้วที่มีการกระจายแสง (Dispersion) ต่ำ แต่มีดัชนีหักเหแสงสูงกว่าแก้วทุกชนิดที่เคยมีการผลิตมา และทำให้มีประโยชน์มากในการทำแก้วเพื่อใช้งานทางแสง (Optical glass)

B_2O_3 นี้นอกจากจะเป็นฟลักซ์ (Flux) แล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวทำให้เกิดโครงร่างของแก้ว ช่วยลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้ว, เพิ่ม Tensile strength, เพิ่มความทนทานต่ออุณหภูมิ, ความหนาแน่น, ความหนืด, อุณหภูมิแอนนิล, อัตราการหลอม และที่สำคัญคือความทนทานต่อสารเคมี จึงนิยมใช้ทำอุปกรณ์เครื่องแก้วที่ต้องใช้งานในสิ่งแวดล้อมของสารเคมี และที่มีอุณหภูมิของการใช้งานสูง เช่น แก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมีต่างๆ

การใช้บอแรกซ์จะทำให้มี Na_2O เพิ่มเข้าไปในแก้วด้วย ดังนั้นในกรณีที่ผลิตแก้วชนิดที่ต้องการให้มีโลหะอัลคาไลด์ต่ำ จะใช้กรดบอริกเป็นแหล่งของ B_2O_3 แทน แต่กรดบอริกจะมีราคาสูงกว่าบอแรกซ์ประมาณ 2 เท่า กรดบอริกจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนี้

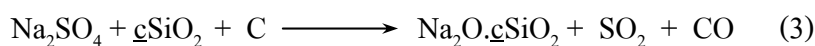
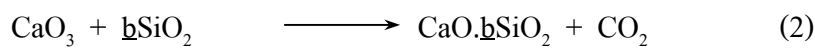
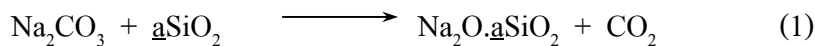


3.1.6 เศษแก้ว (Cullet)

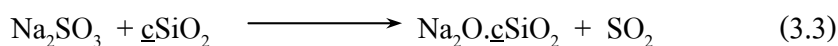
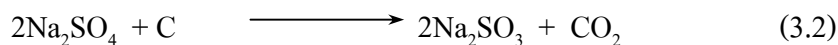
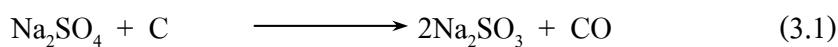
เศษแก้ว เป็นแก้วที่ไม่สมบูรณ์ในการผลิตรุ่นก่อน, เศษแก้วที่ตัดออกผลิตภัณฑ์แก้ว และอาจเป็นแก้วที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว การใช้เศษแก้วนี้อาจใช้ระหว่าง 10 ถึง 80 % โดยน้ำหนักของส่วนผสมที่เข้าเตาหลอม การใช้เศษแก้วนี้ นอกจากเป็นการใช้ประโยชน์แก้วเสีย (Waste) แล้วยังทำให้ส่วนผสมหลอมง่าย แก้วหลอมที่ได้ทำให้มีลักษณะที่ดีตามต้องการง่าย ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ การใช้เศษแก้วมีสิ่งที่จะต้องระวังคือการสูญเสียโซดาแอชโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ ดังนั้นการเพิ่มหรือลดปริมาณเศษแก้วที่ใช้จึงต้องเพิ่มหรือลดปริมาณโซดาแอชตามไปด้วย

3.2. ปฏิกิริยาเคมีในการผลิตแก้ว

ในระหว่างที่ส่วนผสมถูกหลอมเหลวนั้น ส่วนประกอบต่างๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และให้ผลผลิตของปฏิกิริยาเป็นแก๊ส ปฏิกิริยาที่เกิดอาจสรุปได้ดังนี้



ปฏิกิริยาที่ (3) จะเกิดเป็นขั้นดังนี้



อัตราส่วนของ Na_2O ต่อ SiO_2 และ CaO ต่อ SiO_2 ไม่จำเป็นต้องเป็น 1 ต่อ 1 โมล เช่นอาจมีสูตรทั่วไปเป็น $\text{Na}_2\text{O} \cdot 1.8\text{SiO}_2$ เป็นต้น แก้วที่ใช้ทำหน้าที่ต่างจะมีอัตราส่วนประมาณ 2 โมล Na_2O ต่อ 1 โมล CaO ต่อ 5 โมล SiO_2 ส่วนแก้วอื่นๆ จะมีอัตราส่วนต่างไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแก้ว ดังตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ส่วนประกอบของแก้วทางการค้าบางชนิด

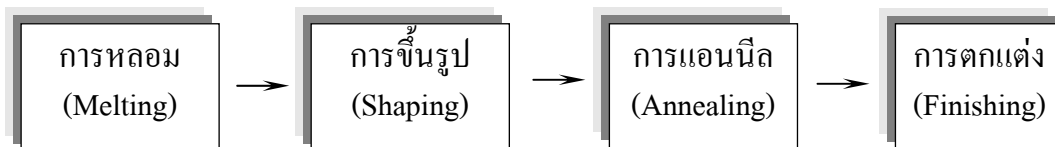
องค์ประกอบ* (%โดยน้ำหนัก)	แก้วอ่อนหรือแก้วโซดา				แก้วแข็ง หรือโบโรซิลิเกต
	ภาชนะ บรรจุ	แก้วแผ่นแก้ว หน้าต่าง	ภาชนะใส่ อาหาร	ใยแก้วและ ฉนวน	
ซิลิกา (SiO ₂)	70 – 74	71 - 74	74 - 74	65 – 74	70 - 82
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	1.5 – 2.5	1 - 2	0.5 - 2	2 – 4.5	2 – 7.5
บอริกออกไซด์ (B ₂ O ₃)	-	-	-	3 – 5.5	9 - 14
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	13 – 16	12 - 15	13 - 15	8 – 16	3 - 8
โปแตสเซียมออก ไซด์ (K ₂ O)				0 – 1	
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	10 - 14	8 - 12	5.5 – 7.5	5 – 16	0.1 – 1.2
แมกนีเซียม ออกไซด์ (MgO)			4.0 – 6.5	3 - 5.5	
แบเรียมออกไซด์ (BaO)**	-	-	-	-	0 – 2.5

* ข้อมูลโดยค่าเฉลี่ย ค่าแท้จริงจะขึ้นอยู่กับผู้ผลิต แหล่งที่ผลิต และแหล่งวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบบางอย่างสามารถให้ผลเหมือนกัน โดยใช้ปริมาณที่ต่างกัน จึงทำให้ส่วนประกอบต่างกันไปได้

** ภาชนะแก้ว (แก้วโซดา) ที่ผลิตในอเมริกา จะมีการใช้แบเรียมออกไซด์ประมาณ 0.5 % ทำให้แก้วแข็งและขึ้นรูปได้เร็ว และช่วยลดปริมาณโซดาลงได้ด้วย

3.3 ขั้นตอนการผลิตแก้ว

กระบวนการผลิตแก้วประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ



3.3.1 การหลอม (Melting)

ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วนั้น ส่วนผสมของวัตถุดิบจะหลอมในอุปกรณ์ที่เรียกว่า เตาหลอมแก้ว (Glass furnace) ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ เตาหลอมแบบหม้อ (Pot furnace) และ เตาหลอมแบบแท้ง (Tank furnace)

3.3.1.1 เตาหลอมแบบหม้อ (Pot furnace)

เตาหลอมแบบนี้จะมีความจุไม่เกิน 2 ตัน ปกติใช้หลอมแก้วพิเศษซึ่งต้องป้องกันไม่ให้แกสที่เกิดจากการสันดาของเชื้อเพลิงสัมผัสโดยตรงกับแก้วเหลว หรือในกรณีที่ต้องการผลิตแก้วในปริมาณน้อย ส่วนมากจึงใช้ในงานผลิตแก้วที่ใช้ในงานทางแสง (Optical glass), แก้วสำหรับงานศิลป์ (Art glass) และแก้วแผ่น (Plate glass) ที่ผลิตโดยกระบวนการหล่อแบบ (Casting process) หม้อหลอมแก้วนี้จะทำจากดินเหนียวพิเศษหรือแพลตตินัม ในกรณีที่ใช้ดินเหนียวจะมีปัญหาที่แก้วเหลวมักถูกปนเปื้อนด้วยสารที่หลุดออกจากผนังหม้อ การใช้แพลตตินัมจึงดีกว่าที่ปลอดภัยจากการปนเปื้อน แต่มีข้อเสียที่มีราคาสูง (รูป 3.1)

3.3.1.2 การหลอมแก้วแบบแท้ง (Tank furnace)

เตาหลอมแบบนี้จะมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมหลังคารูปโดมดังแสดงในรูปที่ 3.2 เตาประเภทนี้จะมีความจุสูงกว่าแบบหม้อ เช่น อาจมีขนาดกว้าง 30 ฟุต ยาว 120 ฟุต สูง 5 ฟุต ซึ่งจะหลอมแก้วได้ 1,400 ตัน ส่วนผสมของวัตถุดิบที่บดได้ขนาดและผสมเข้ากันแล้ว จะไหลไปที่ปลายหนึ่งของเตาซึ่งเป็นบริเวณที่เรียกว่า ย่านหลอมตัว (Melting zone) แก้วเหลวจะ

รวมตัวกันอยู่ในแท่งคัพ 2 ด้านข้างทั้ง 2 ด้าน ติดไว้ด้วยหัวเตาเผา เชื้อเพลิงซึ่งส่วนมากใช้น้ำมันเตาจะถูกฉีดผ่านหัวเตาด้านใดด้านหนึ่ง เปลวไฟจะพ่นอยู่เหนือแก้วเหลว และแก๊สที่เกิดจากการสันดาปนั้นหลังจากการถ่ายเทความร้อนให้แก่แก้วเหลวแล้วจะออกไปตามปล่องระบายซึ่งอยู่ด้านตรงข้าม การใช้หัวเตาจะใช้ครั้งละด้านในช่วงระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นสลับด้านหัวเตาสลับกันไปมาตามเวลาที่กำหนด



รูป 3.1 เตาหลอมแบบหม้อ (Pot furnace)

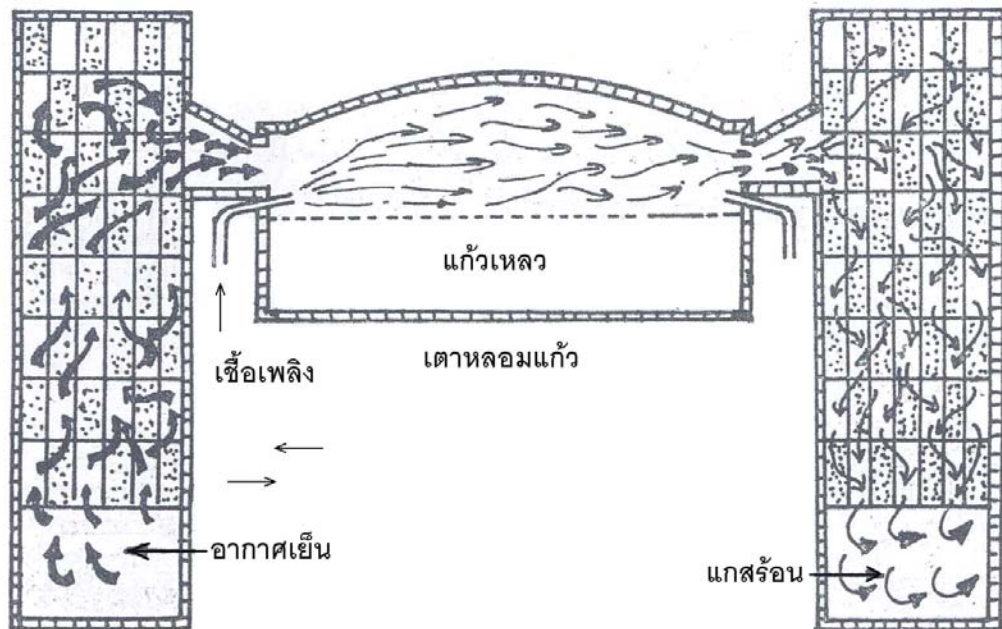
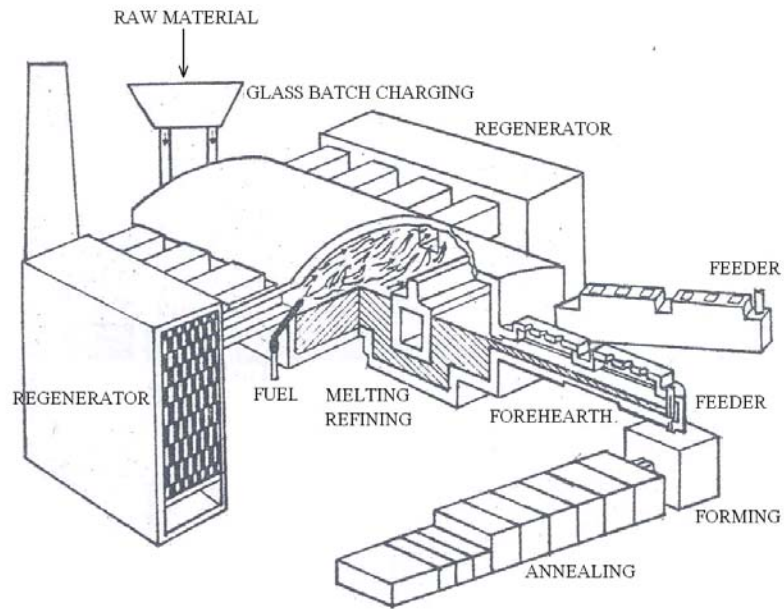
ส่วนผสมที่เกิดการหลอมจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวให้ออกไซด์ดังปฏิกิริยาในหัวข้อที่ 3.2 และให้แก๊สซึ่งส่วนมากจะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะลอยขึ้นไปยังผิวหน้าของเนื้อแก้วเหลว (Melting glass) และออกจากเตา ไปกับแก๊สที่เป็นผลผลิตของการสันดาปของเชื้อเพลิง แก้วหลอมจะไหลเข้าไปในส่วนถัดไปซึ่งเรียกว่า ห้องไล่ฟอง (Fining zone) ซึ่งแก๊สที่หลงเหลืออยู่ในแก้วเหลวจะถูกไล่ออกไปจากเนื้อแก้ว ทั้งนี้เนื่องจากห้องไล่ฟองจะมีอุณหภูมิสูงกว่าทำให้แก้วมีความหนืดต่ำกว่าและฟองแก๊สขยายตัวมากกว่าทำให้เบากว่าทำให้แยกตัวออกจากเนื้อแก้วได้มากขึ้น เนื้อแก้วเมื่อมีฟองแก๊สน้อยลงจะมีความหนาแน่น

เพิ่มสูงขึ้น จึงจมลงสู่ส่วนล่างของเตาเรียกว่า **ห้องแก้วใส (Refining zone)** หรือ **ห้องดึงแก้ว (Drawing chamber zone)** แก้วเหลวจะถูกทำให้อุณหภูมิลดลง เพื่อให้มีความหนืดพอเหมาะ สำหรับการขึ้นรูป (Shaping) ต่อไป ปลายของเตาหลอมมักจะมีช่องหรือรางหลายช่องเพื่อนำอุปกรณ์สำหรับการขึ้นรูปมาต่อเข้าและดึงแก้วเหลวไปทำผลิตภัณฑ์ต่อไป

โดยทั่วไปแก๊สที่เป็นผลผลิตของการสันดาปเชื้อเพลิงนั้นแม้ว่าจะถ่ายเทความร้อนให้แก่แก้วเหลวแล้วก็ตามแต่ยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงมีการนำพลังงานความร้อนที่เหลือนั้นกลับมาใช้ใหม่โดยการนำไปอุ่นอากาศที่ใช้ในการสันดาปให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังทำให้อุณหภูมิในเตาหลอมแก้วสูงกว่ากรณีที่ใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นตัวช่วยในการสันดาป วิธีที่ใช้ในการนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้ใหม่นี้มี 2 แบบ ทำให้เตาหลอมแก้วแบบแท่งนี้จำแนกย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) แบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative type)

วิธีการนำพลังงานความร้อนกลับมาโดย ปล่องระบายแก๊สผลผลิตของการสันดาปจะต่อเข้ากับห้องซึ่งอยู่ด้านข้างของเตาหลอม ภายในวางเรียงซ้อนไว้ด้วยอิฐซึ่งอาจวางซ้อนสลับกันไปมา อิฐจะดูดความร้อนไว้ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นส่วนแก๊สจะเย็นตัวลงและปล่อยทิ้งไปทางปล่องระบายที่ตอนบนของห้อง หรือในบางกรณีอยู่ตอนล่างของห้อง เมื่ออุณหภูมิสูงพอจะมีการกลับด้านของหัวเตาเผาเชื้อเพลิง และกลับวาล์วควบคุมการเคลื่อนที่ ซึ่งใช้เป็นแก๊สช่วยสันดาปทันที ดังนั้น แก๊สร้อนจะออกไปทางปล่องระบายด้านตรงข้ามซึ่งต่อเข้ากับห้องลักษณะเดียวกันที่อยู่ด้านตรงข้ามของเตาหลอม และไปเผาอิฐที่บรรจุไว้ภายในให้ร้อนกลับเข้ามาใหม่ ห้องทั้งคู่นี้จึงทำงานเป็นรอบ แต่ละรอบจะประกอบด้วยระยะเวลาที่ดูดความร้อนและระยะเวลาที่ถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศ ซึ่งจะใช้เวลาการทำงานประมาณ 20 – 30 นาที ต่อรอบ เราเรียกว่า Regenerative chamber และเรียกเตาหลอมแก้วแบบนี้ว่า **เตาหลอมแบบรีเจนเนอเรทีฟ** ดังรูปที่ 3.2



รูป 3.2 การหลอมแก้วแบบแท้งค์ (Tank furnace)

2) แบบรีคิวเบอร์ทีฟ (Recuperative type)

เตาหลอมแบบนี้จะมีหัวเตาเผาเชื้อเพลิงด้านเดียวเท่านั้น แกสร้อนที่เป็นผลผลิตของการสันดาปจะออกไปทางปล่องระบายด้านตรงข้าม ภายในเป็นท่อดินเหนียว (Tile) ซึ่งมีอากาศเย็นไหลผ่านแกสร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้แก่อากาศผ่านผนังท่อนี้และอากาศเมื่อถูกทำให้ร้อนขึ้นแล้วจะถูกส่งไปช่วยสันดาปต่อไป การแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เกิดอย่างต่อเนื่องจึงไม่ต้องทำการกลับทิศทางแบบรีเจนเนอเรทีฟ แต่เตาแบบนี้จะมีปัญหาเกี่ยวกับการรั่วซึม และการอุดตันทำให้เสื่อมความนิยมไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่เตาหลอมมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากการหยุดเตาและการเริ่มติดเตาแต่ละครั้งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก

ในการเริ่มติดเตาหลอมแก้วแต่ละครั้งจะใช้เวลาหลายวัน จะเผาเตาให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นช้า ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการขยายตัวของวัสดุที่ใช้สร้างเตา ระยะเวลาดังกล่าวนี้เองที่เป็นระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิงที่ไม่มีผลิตภัณฑ์แต่อย่างใด เมื่ออุณหภูมิของเตาไปถึงช่วงระยะเวลาที่กำหนดซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของแก้วที่ต้องการผลิต ส่วนผสมของวัตถุดิบจึงจะเริ่มป้อนเข้าเตาหลอม โดยทั่วไปความร้อนส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ในการหลอมวัตถุดิบ ความร้อนส่วนใหญ่จะสูญเสียไปยังบรรยากาศที่ล้อมรอบโดยการแผ่รังสีของผนังเตา และแม้ว่าจะมีการแผ่รังสีนี้ที่ทำให้ผนังเตาเย็นตัวลง อุณหภูมิของผนังเตายังมีค่าสูงจนกระทั่งแก้วเหลวสามารถละลายผนังเตาบางส่วน และกัดกร่อนผนังเตาได้อย่างรวดเร็วเพื่อลดผลของแก้วเหลวที่มีต่อผนังเตาหลอม และในมุมมองกลับลดผลของการปนเปื้อนเนื้อแก้วอันเนื่องมาจากการสึกกร่อนของของเตาเผา นี้จึงมักนิยมเดินท่อไว้ในผนังเตาหลอม เพื่อรักษาผนังเตาหลอมให้มีอุณหภูมิต่ำพอ ที่จะไม่ให้ถูกกัดกร่อนได้ง่ายด้วยแก้วเหลว

3.3.2 การขึ้นรูป (Shaping or Forming)

การทำแก้วเหลวให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ทำได้โดยใช้เครื่องจักร หรือแบบ (Mold) และในกรณีที่ผลิตในปริมาณน้อยหรืองานที่ต้องการความประณีตสูง ใช้การเป่าด้วยแรงงานคนโดยการใช้ท่อเป่าแก้ว (Blowpipe) ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้สิ่งที่สำคัญและเหมือนกันได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำรูปร่าง ปกติจะต้องใช้เวลาเพียง 2-3 วินาที ในระยะเวลาสั้นๆ นี้แก้วเหลวจะเย็นตัวลงทำให้ความหนืดเพิ่มสูงขึ้น จนไหลไม่ได้อีกต่อไป จะมีลักษณะปรากฏเป็นของแข็งไป โดยทั่วไปการออกแบบผลิตภัณฑ์แก้วและเครื่องมือสำหรับการขึ้นรูปแก้วจึงต้องพิจารณาถึง การเคลื่อนที่ของความร้อน ความคงทนของวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปหรือทำแบบ (Mold) ตลอดจนช่องว่างระหว่างรอยต่อต่างๆ ของชิ้นหรืออุปกรณ์ของเครื่องมือที่ใช้ สิ่งเหล่านี้ค่อนข้างจะเป็นปัญหาที่ยุ่ยากทีเดียวสำหรับการออกแบบที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเรามีวิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายแบบหลายวิธี

ในที่นี้เราจะกล่าวถึงวิธีการผลิตแก้วบางแบบ เช่น แก้วทำหน้าต่าง (Window glass), แก้วแผ่น (Plate glass), ขวด (Bottles), หลอดไฟ (Light bulb), ท่อแก้วกลาง (Tubing) และแท่งแก้วตัน (Glass rod)

3.3.2.1 การทำแก้วหน้าต่าง (window glass)

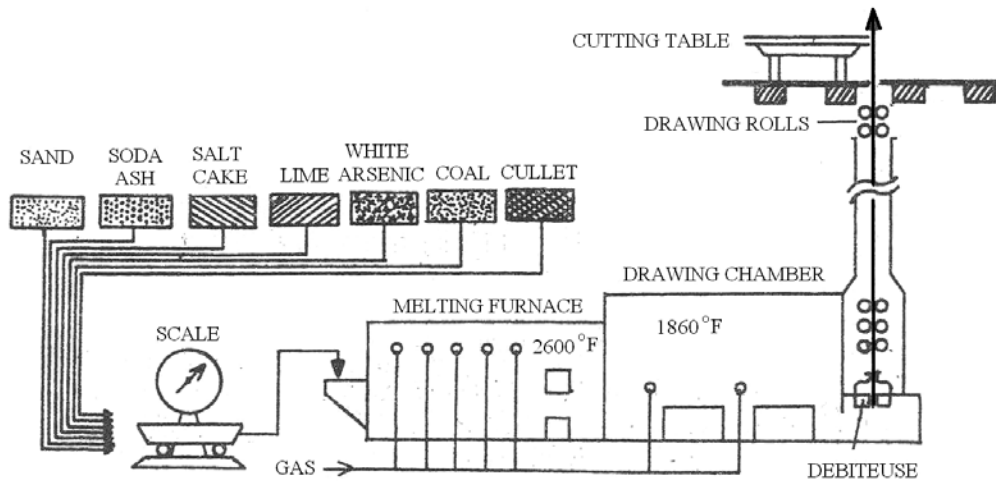
ในอดีตการผลิตแก้วหน้าต่างใช้แรงงานคนโดยการใช้ท่อเป่าแก้ว (Blowpipe) ให้เป็นท่อแก้ว (Tubing) ทรงกระบอก จากนั้นทำให้แก้วทรงกระบอกแยกออกจากกันตามแนวยาว แล้วนำไปอบให้ร้อน จะทำให้แก้วแผ่และแบนราบเป็นแก้วแผ่นในที่สุด ในปัจจุบันการทำแก้วแผ่นเรียบที่นิยมใช้กระบวนการดึงแก้วอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมี 2 กระบวนการคือ กระบวนการโฟร์คอลลท์ (Fourcault process) และ กระบวนการคอลลเบิร์น (Colburn process) โดยมีหลักการพื้นฐานเหมือนกันคือ แก้วเหลวจะถูกดึงออกทางช่อง (slot) ยาวเท่ากับขนาดหน้ากว้างของแก้วแผ่นที่ต้องการผลิต จากนั้นถูกกรีดด้วยชุดลูกกลิ้ง (Rolls) (ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่หุ้มด้วยแอสเบสตอส) ผ่านเตาอบลดความเครียดของเนื้อแก้วเรียกว่า เลห์ (Lehr) และตัดเป็นแผ่นความยาวตามต้องการที่โต๊ะตัด (Cutting table) ในที่สุด ดังรูปที่ 3.3

1) กระบวนการโฟร์คอลลท์ (Fourcault process)

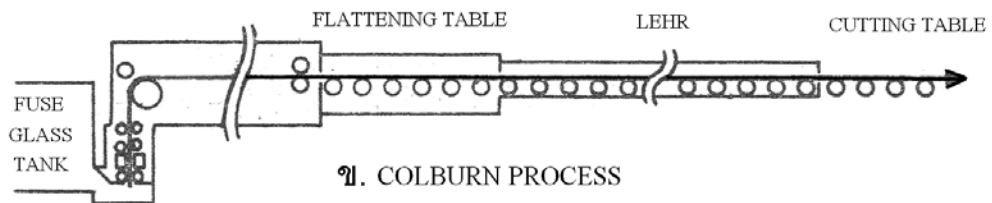
แก้วจะถูกดึงจากห้องแก้วใสด้วยเครื่องดึง (Drawing machine) โดยผ่านหัวปล่อยแก้ว (Debiteuse) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทำจากอิฐทนไฟ (Refractory boat) ตรงกลางมีช่อง (Slot) ขาวให้แก้วเหลวไหลผ่านได้ หัวปล่อยแก้วนี้สามารถบังคับให้เคลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้ง ด้านล่างจะจมอยู่ในแก้วเหลว การดึงแก้วเริ่มด้วยการใช้ตัวล่อ (Metal bait) เคลื่อนลงมาใกล้ช่องหัวเป่าแก้ว ต่อไปเลื่อนตัวล่อผ่านช่องดังกล่าวและจมลงในเนื้อแก้ว ขณะที่ตัวล่อที่มีแก้วเหลวเกาะติดอยู่เริ่มเคลื่อนถอยหลังขึ้นไปในแนวตั้ง หัวปล่อยแก้วจะถูกบังคับให้เคลื่อนตัวลงไปแนวตั้ง แรงกดของหัวปล่อยแก้วจะช่วยดันให้แก้วไหลผ่านช่องเร็วขึ้น แก้วจะไหลตามตัวล่อออกไปอย่างต่อเนื่องและด้วยอัตราเท่ากับแก้วที่ดึงขึ้นไปในแนวตั้ง ผ่านเล่ห์ยาวประมาณ 25 ฟุต ปลายของเล่ห์เป็นโต๊ะตัดแก้ว ซึ่งแก้วจะถูกตัดออกเป็นแผ่นที่มีความยาวตามต้องการ ผ่านขั้นตอนการคัดเลือกและในบางกรณีนำไปตัดให้มีขนาดเล็กลงตามต้องการก่อนบรรจุและส่งขายต่อไป (รูป 3.3 ก)

2) กระบวนการคอลเบิร์น (Colburn process)

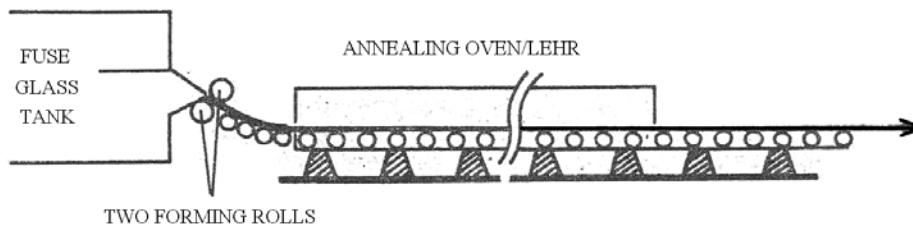
กระบวนการคอลเบิร์น ถูกนำมาใช้ในการทำแผ่นแก้ว ในปี ค.ศ. 1917 โดยบริษัท Libbey-Owens Sheet glass (ในปัจจุบัน คือ บริษัท Libbey owens-ford glass) ซึ่งมีหลักการเดียวกันกับกระบวนการ โฟร์คอลลท์ แต่เมื่อแก้วถูกดึงขึ้นมาสูงประมาณ 3 ฟุต จากผิวแก้วเหลวแล้ว แก้วจะถูกเผาให้ร้อนและกดให้โค้งงอพาดไปบนลูกกลิ้ง และเคลื่อนที่ไปในแนวนอน โดยถูกบีบติดกับสายพาน แผ่นแก้วจะเคลื่อนผ่านเล่ห์ที่มีลูกกลิ้ง 200 อัน ก่อนออกไปยังโต๊ะตัดแก้ว ดังนั้น กระบวนการนี้จึงต่างจากกระบวนการ โฟร์คอลลท์ ที่การดึงแก้วเกิดในแนวนอน(รูป 3.3 ข)



ก. FOURCAULT PROCESS



ข. COLBURN PROCESS



ค. CONTINUOUS SHEET PROCESS

รูป 3.3 การทำแก้วหน้าต่าง และแก้วแผ่น

3.3.2.2 การทำแก้วแผ่น (Flat glass)

ความจริงแล้วแก้วแผ่นก็เหมือนกันกับแก้วทำหน้าที่ต่าง เพียงแต่แก้วชนิดนี้จะมีควมหนามากกว่านั่นเอง ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 1 การทำแก้วประเภทนี้ใช้วิธีหล่อและรีดบนโต๊ะ โดยแก้วเหลวจะถูกเทลงบนโต๊ะที่ทำจากเหล็กหล่อ จากนั้นรีดด้วยลูกกลิ้งที่ทำให้เย็นด้วยน้ำ แก้วจะแผ่ออกไปและมีความหนาเท่า ๆ กัน ปกติโต๊ะจะมีขนาด 16 x30 ฟุต และเพื่อป้องกันไม่แก้วเกาะติดพื้นโต๊ะจะโรยผิวโต๊ะด้วยเม็ดทรายละเอียดก่อน แก้วแผ่นที่ได้จะถูกนำไปอบลดความเครียดต่อไป การทำแก้วแผ่นแบบนี้ต้องอาศัยประสบการณ์ การควบคุมเวลาอย่างมากทั้งในทางการเทแก้วเหลวลงบนโต๊ะ และการรีดด้วยลูกกลิ้ง

ต่อมาระหว่างปี ค.ศ. 1922 และ 1924 บริษัท Ford Motor และ Pittsburg Plate glass ต่างก็พัฒนากระบวนการผลิตแก้วแผ่น (Continuous sheet process) อย่างต่อเนื่อง โดยแก้วเหลวจะถูกรีดด้วยลูกกลิ้งคู่หนึ่งเรียกว่าลูกกลิ้งทำรูป (Forming rolls) ภายในลูกกลิ้งมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน

แก้วเหลวที่ร้อนแดงจึงถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนผิวหน้าแข็ง จากนั้นเคลื่อนผ่านไปบนลูกกลิ้งลำเลียง (Conveyor rolls) ผ่านเตาอบ (Lehr) ยาวประมาณ 200-300 ฟุต ก่อนถูกตัดเป็นแผ่น ขัดแต่งและตกแต่งต่อไป (ดังรูปที่ 3.3 ค) กระบวนการต่อเนื่องนี้ทำให้ได้แก้วแผ่นที่มีความหนาสม่ำเสมอในปริมาณมาก จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ ในกรณีที่ผลิตน้อยวิธีการนี้จะไม่เหมาะสมเนื่องจากสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก จะใช้วิธีหล่อและรีดด้วยลูกกลิ้งแทน

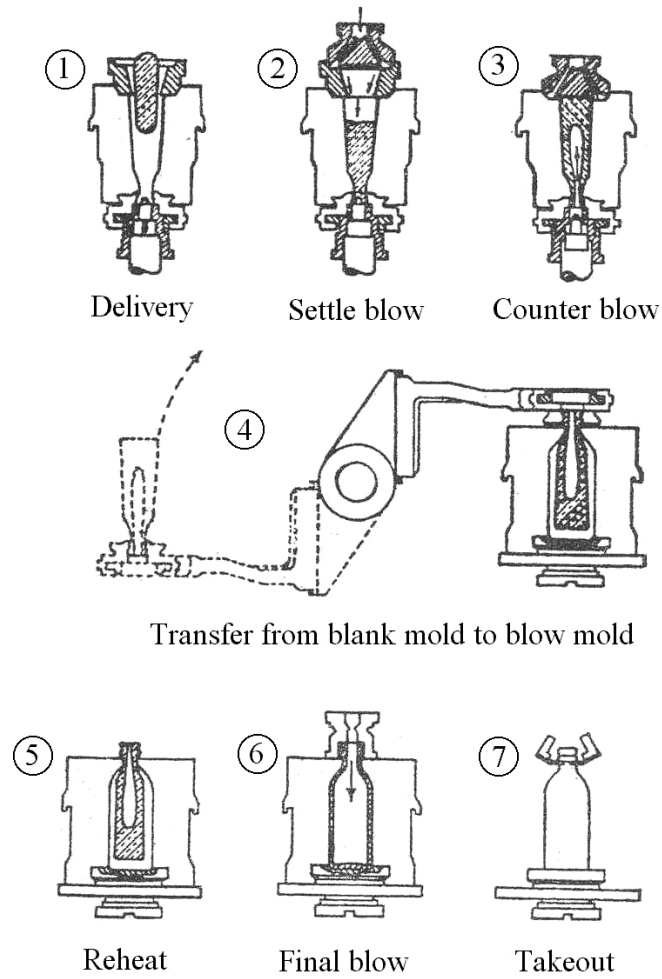
3.3.2.3 การทำขวดแก้ว (Bottle glass)

ในปัจจุบันการทำขวดแก้วใช้เครื่องจักรอัตโนมัติโดยกรรมวิธีการเป่าแบบที่เรียกว่า “เป่าและเป่า” (Blow and blow) เนื่องจากมีการทำงานเป็น 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 แก้วเหลวจากห้องแก้วใสจะไหลไปตามรางไฟทำด้วยอิฐทนไฟ เรียกว่า เครื่องป้อนแก้ว (Feeder) ผ่านขั้นตอนการทำให้เย็นและปรับสภาพก่อนไหลลงสู่กรวยปลายเปิด แก้วจะไหลย่อยเป็นก้อน เมื่อได้ขนาดแล้วจะถูกตัดด้วยกรรไกร ทำให้ได้ก้อนแก้วรูปค่อนข้างคล้ายทรงกระบอกเรียกว่า ก้อนแก้ว (Gob) โดยมีปลายล่างกลมมนและโตกว่า

ปลายบนอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วง ก้อนแก้วจะตกลงไปในแบบ ซึ่งมีลักษณะคล้ายขวดคว่ำ เพียงแต่ขนาดของขวดจะยาวเพียง 2/3 ของความสูงขวดที่ต้องการ ก้อนแก้วที่ร้อนแดงนี้จะตกลงไปที่ก้นแบบและเป่าด้วยลมให้เนบกับก้นแบบซึ่งมีลักษณะเป็นคอขวด จากนั้นเครื่องจักรจะแทงก้อนแก้วด้วยเดือย (plunger) และเป่าลมผ่านเดือยเข้าไปในก้อนแก้วทำให้แก้วขยายออกไปเนบกับแบบ แบบที่ใช้เรียกว่า **Blank mold** หรือ **Parison mold** แก้วที่เป่าได้จากแบบนี้จึงเรียกว่า **Blank** หรือ **Parison** ซึ่งหากจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือเป็นขั้นตอนการทำปากและคอขวดนั่นเอง

ขั้นตอนที่ 2 แบบจะแยกออกเหลือแต่ **Parison** ที่ยังติดกับเดือยอยู่ เดือยนี้ติดอยู่กับแขนเครื่องจักรซึ่งเหวี่ยงไป 180 องศา ทำให้ **Parison** ซึ่งเดิมมีลักษณะเป็นขวดคว่ำกลับเป็นขวดหงาย เข้าไปอยู่ใน **Blow mold** ซึ่งมีขนาดช่องว่างภายในและรูปร่างเท่ากับต้นแบบที่จะเป็นตัวขวด จากนั้นจะมีการเพิ่มอุณหภูมิให้แก้วอ่อนตัวอีกครั้ง แล้วเป่าลมเข้าไปภายในขวด จนทำให้เนื้อแก้วพองตัวออกไปเนบกับผนังของ **Blow mold** มีขนาดและรูปร่างตาม **Blow mold** เมื่อเนื้อแก้วแข็งตัวจึงแกะขวดออกจาก **Blow mold** แสดงในรูป 3.4



รูป 3.4 ขั้นตอนการทำขวดแก้วโดยการเป่าในแบบ

3.3.2.4 การทำหลอดไฟฟ้า (Light bulbs)

การเป่าแก้วให้เป็นกระเปาะบาง (Thin bulb) จะต่างจากการทำขวดแก้ว โดยที่รูปร่างและขนาดของกระเปาะจะถูกกำหนดโดยอากาศที่ใช้เป่าให้แก้วมีรูปร่างตามต้องการ แทนที่จะเป็นแบบ (Mold) ที่ใช้เหมือนในกรณีอื่น ๆ

การทำหลอดไฟฟ้า เริ่มจากแก้วเหลวไหลผ่านช่องเล็ก ๆ และถูกรีดด้วย ลูกกลิ้ง 2 ตัวที่ทำให้เย็นด้วยน้ำ ลูกกลิ้งตัวบนจะมีปุ่มและทำให้เนื้อแก้วถูกกดจนเกิดการบวม โป่งบนแผ่นแก้ว แผ่นแก้วจะเคลื่อนและพาดไปบนสายพานลำเลียงซึ่งมีรูเป็นระยะในลักษณะที่ แก้วที่บวม โป่งพาดพาดตรงรูของสายพานพอดี ปริมาณแก้วในรูจะพอเพียงที่จะเป่าให้เป็น หลอดไฟ เมื่อแก้วถูกสายพานพาไปจนถึงส่วนที่ขึ้นรูป จะมีหัวฉีดอากาศเคลื่อนลงมากดแนบกับ ผิวแก้ว จากนั้นอากาศจะถูกพ่นลงไปทำให้แก้วขยายตัวออกไปทางด้านล่างของสายพาน เมื่อพ่น ขี้ด้วยอากาศ กระเปาะแก้วจะขยายตัวออกไปจนเต็มแบบ จากนั้นแบบจะเคลื่อนถอยและหลุด ออกจากสายพาน ทำให้ได้หลอดไฟที่อยู่ส่วนล่างของสายพาน ต่อไปจะมีก้อนเล็ก ๆ มาเกาะเบา ๆ ทำให้หลอดไฟขาดจากขั้ว และหล่นลงไปยังบนสายพานแอสเบสตอสที่อยู่ต่ำลงไป สายพานแอส เบสตอสจะพาหลอดไฟไปยังเตาอบ (Lehr) โดยก่อนเข้าเตาอบ หลอดไฟจะถูกเรียงในลักษณะที่ เอาคอหลอดไฟคว่ำลง เมื่ออบแล้วจะถูกทำให้แข็งโดยการพ่นภายในของหลอดไฟด้วยกรด ไฮโดรฟลูออริก ก่อนนำไปใส่ใส่หลอดไฟ และฉีกต่อไป

ระยะเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปและอบประมาณ 8 นาที เครื่องจักรทั่วไปจะ ผลิตได้ 400 – 600 หลอดต่อนาที หนึ่งหลอดไฟอาจมีลักษณะและขนาดต่าง ๆ กัน เครื่องจักร ประเภทนี้จึงมักเป็นแบบที่มีล้อเลื่อน เมื่อต้องการใช้งานจะลากหรือเข็นไปต่อเข้ากับเครื่องดึง แก้วของห้องแก้วใส และเมื่อเลิกใช้ก็จะเข็นแยกออกไป และเข็นเครื่องจักรใหม่เข้ามาแทนที่ ต่อไป

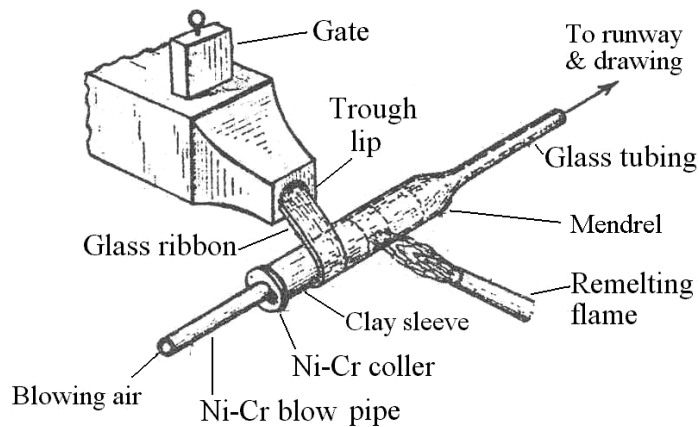
3.3.2.5 การทำท่อแก้วกลวง (Glass tubing) และแท่งแก้วตัน (Glass rod)

เดิมการทำท่อแก้วกลวงใช้แรงงานคน โดยการเป่าด้วยท่อเป่าแก้ว (Glass blowpipe) โดยวิธีนี้จะต้องทำงานเป็นกลุ่ม ๆ ละ 3 คนโดยช่างจะนำท่อเป่าแก้วจุ่มลงในหม้อที่ บรรจุแก้วเหลว หมุนท่อเป่าแก้วรอบแนวแกนเพื่อรวบรวมแก้ว เมื่อได้ปริมาณตามต้องการจะยก

ก่อนแก้วขึ้นจากหม้อ ช่างคนที่ 2 จะนำแท่งโลหะมากดติดกับเนื้อแก้วที่อยู่ด้านตรงข้ามกับปลายท่อเป่าแก้วจากนั้นช่างเป่าแก้วคนแรกจะเป่าลมเข้าไปในท่อเป่าแก้วพร้อมกับหมุนท่อเป่าแก้วรอบแนวแกน และเดินถอยหลังไป ช่างคนที่ 2 จะคอยหมุนแท่งโลหะในมือตามเพื่อให้แก้วเกิดการบิดตัวเป็นเกลียว และเคลื่อนตัวถอยหลังไปพร้อม ๆ กัน ทำให้ได้หลอดแก้วกลวงยาว ช่างคนที่ 3 ทำหน้าที่วัดขนาดของหลอดแก้วให้ได้ขนาดตามต้องการ เมื่อได้ขนาดแล้วช่างเป่าแก้วคนแรกช่างคนที่ 2 จะหยุดการเคลื่อนถอยหลัง แต่จะยังคงหมุนท่อและแท่งโลหะในมือไปเรื่อย ๆ จนกว่าแก้วจะเย็นตัวและแข็งจากนั้นจะตัดหลอดแก้วออกจากท่อโลหะ ได้ท่อแก้วกลวงในที่สุด ในปัจจุบันการทำท่อแก้วกลวงโดยใช้เครื่องจักรเข้ามาแทน แต่การทำท่อแก้วพิเศษบางอย่างยังคงใช้วิธีด้วยแรงงานคนตามเดิม วิธีการที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 กระบวนการคือ กระบวนการแดนเนอร์ (Danner process) และ กระบวนการเวลโล (Vello process)

1) กระบวนการแดนเนอร์ (Danner process)

แก้วเหลวจากแท่งหรือหม้อ ถูกถ่ายไปยังหม้อพิเศษและถูกปล่อยลงราง ซึ่งแบ่งเป็น 3 ส่วน โดยมีแผ่นกั้นและช่องลวด แผ่นกั้นจะช่วยกักสิ่งสกปรกที่ลอยเป็นฝ้านบนผิวหน้าแก้วเหลว และแก้วเหลวที่ได้คุณภาพจะไหลลอดช่องลวดได้แผ่นกั้นไปยังห้องถัดไป แก้วที่ออกไปทางปลายรางจะควบคุมอัตราได้ด้วยประตูกั้น (Gate) จากนั้นแก้วเหลวจะถูกดึงมาพาดกับท่อทรงกระบอกปลายเรียวเล็กกลวง เรียกว่า **Mandrel** (ท่อประกอบด้วยท่อโลหะผสมนิกเกิล-โครเมียม หุ้มด้วยดินเหนียว หรือวัสดุทนไฟอื่น ๆ ส่วนปลายที่เรียวแหลมเป็นโลหะผสมนิโครม) ท่อจะหมุนรอบแนวแกนในทิศทางที่จะทำให้แก้วพันรอบเมนเดรลมากขึ้น หัวเมนเดรลทำมุมระหว่าง 12 -18 องศา โดยมีปลายเรียวแหลมเอียงลงซึ่งจะทำให้แก้วเคลื่อนไปทางปลายเรียวตลอดเวลา แก้วหลอมที่พาดบนเมนเดรลจะมีลักษณะเป็นแผ่นยาวจึงต้องเผาด้วยหัวตะเกียงที่มีอุณหภูมิเหมาะสมเพื่อให้แก้วหลอมและเชื่อมติดกัน ดังรูป 3.5 แก้วที่เคลื่อนที่ไปทางปลายเรียวแหลมจึงถูกดึงออกและเคลื่อนไปบนลูกกลิ้ง เข้าเตาอบยาว 200-300 ฟุต ก่อนจะผ่านไปยังโต๊ะตัดแก้ว ในขณะที่ดึงแก้วนั้นหากมีการเป่าลมเข้าไปในท่อ นิกเกิล-โครเมียม จะทำให้แก้วที่ดึงได้เป็นท่อแก้วกลวง (Glass tubing) แต่ถ้าไม่มีการพ่นลมเข้าไปในท่อจะได้แท่งแก้วตัน (Glass rod) แทน



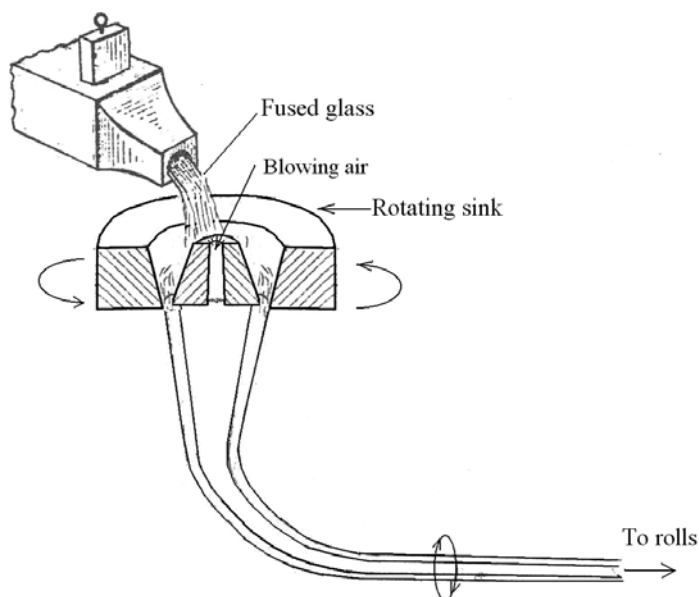
รูป 3.5 การทำท่อแก้วกลวงและแท่งแก้วตันโดยกระบวนการแคนเนอร์

2) กระบวนการเวลโล (Vello process)

การผลิตแก้วโดยกระบวนการนี้แก้วเหลวจะถูกปล่อยลงไปในอุปกรณ์รูปกรวยซ้อน 2 ชั้น (รูป 3.6) ช่องว่างระหว่างกรวยจะแคบเล็กลงไปตามปลายกรวย อุปกรณ์นี้หมุนรอบตัวเองช้า ๆ เมื่อแก้วเหลวไหลลงไปในกรวย แรงโน้มถ่วงจะทำให้แก้วไหลไปทางปลายกรวย เมื่อแก้วเคลื่อนลงไปในแนวตั้งได้ระยะหนึ่ง แก้วจะถูกดึงให้เคลื่อนไปทางแนวนอนผ่านชุดลูกกลิ้ง และส่งต่อไปเข้าเตาอบ และผ่านไปยังโต๊ะตัดแก้วในที่สุด กรวยในจะมีท่อกลวงตรงกลางซึ่งเมื่อพ่นด้วยลมที่มีความดันคงที่ จะทำให้แก้วที่ดิ่งนั้นเป็นท่อแก้วกลวง แต่หากไม่มีการพ่นลมจะได้แท่งแก้วตันเช่นเดียวกับกระบวนการแคนเนอร์

การผลิตหลอดแก้วเพื่อทำเทอร์โมมิเตอร์จะยุ่งยากกว่า โดยปริมาณของแก้วเหลวต้องควบคุมให้ดีเพื่อให้ได้หลอดแก้วที่มีขนาดทั้งภายนอกภายในคงที่ จากนั้นผิวด้านหนึ่งจะถูกทำให้ทึบแสงโดยการเคลือบทึบด้วยแก้วสีขาว และเคลือบทึบด้วยแก้วเนื้อใสอีก

ชั้นหนึ่ง ก่อนนำไปคัดแยก และตกแต่งที่ไม่เรียบร้อยด้วยแรงงานคน จากนั้นส่งไปดำเนินการเพื่อให้ได้เทอร์โมมิเตอร์ที่สมบูรณ์ต่อไป



รูป 3.6 การทำท่อแก้วกลางหรือแท่งแก้วตันโดยกระบวนการเวดโว

3.3.2.6 แก้วอื่น ๆ

แก้วบางอย่างเช่น แผ่นแก้วทำท่อขนาดใหญ่, จุกแก้วชนิดภายในกลาง, ปริซึม, แก้วสำหรับการใช้งานทางแสง, เครื่องครัว, แก้วสีบางชนิด, แก้วที่ใช้ในงานตกแต่ง และอื่น ๆ อาจผลิตโดยการหล่อแบบหรือขึ้นรูปในแบบโดยอาศัยแรงงานคน โดยที่แก้วเหลวจะถูกดึงออกจากเตาหลอมให้มีปริมาณตามที่ต้องการ จากนั้นนำไปใส่ในแบบ กำจัดแก้วส่วนเกินออกด้วยกรรไกรแล้วอัดหรือประกบแบบเข้าด้วยกันก่อนเอาไปดำเนินการต่อไป เช่น อัดให้มีรูปร่างตามต้องการ หรือพ่นลมเข้าไปในแบบทำให้แก้วขยายออกไปแนบกับแบบ อุปกรณ์แก้วบางอย่างจะผลิตโดยกระบวนการกึ่งอัตโนมัติ เช่น พวงขวดวัดปริมาตร ท่อแก้วแข็งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ เพื่อใช้ทำหอ (tower) หรือคอลัมน์ในการปฏิบัติการต่าง ๆ ทั้งระดับเครื่องมือต้นแบบ (pilot plant) และระดับอุตสาหกรรม

3.3.3 การอบ (Annealing)

ผลิตภัณฑ์แก้วที่ขึ้นรูปแล้วต้องผ่านการอบเพื่อลดความเครียดในเนื้อแก้วอันเนื่องมาจากปฏิบัติการแก้วภายใต้ภาวะอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ก่อนหน้านั้น (คือระหว่างการขึ้นรูป) ทั้งนี้ไม่ว่าแก้วจะผลิตด้วยเครื่องจักรหรือแรงงานคนก็ตาม การอบแก้วจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน คือ

ขั้นตอนที่ 1 แก้วจะถูกทำให้ร้อนจนกระทั่งแก้วมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤติ ซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป และต้องรักษาอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวนานพอ ภายใต้ภาวะของอุณหภูมิดังกล่าว โมเลกุลของแก้วจะเคลื่อนตัวได้อย่างช้า ๆ และการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเหล่านี้เองที่ทำให้ความเครียดในเนื้อแก้ว ลดลงจนอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัยต่อการใช้งาน

ขั้นตอนที่ 2 แก้วจะถูกทำให้เย็นอย่างลงช้า ๆ จนกระทั่งอุณหภูมิของแก้วลดลงมาที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าเล็กน้อย (อาจถึง 60°C) ก่อนนำผลิตภัณฑ์แก้วออกจากเตาอบและส่งไปยังหน่วยถัดไป เตาอบที่ใช้เรียกว่า เลห์ (Lehr) หรือ Annealing oven โดยมีตัวกลางให้ความร้อนเป็นแก๊สที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิง ในปัจจุบันเตาอบแก้วส่วนมากเป็นระบบอัตโนมัติที่สามารถตั้งอุณหภูมิ และควบคุมการไหลของอากาศได้

3.3.4 การตกแต่ง (Finishing)

แก้วบางอย่างเมื่ออบแล้วจะคัดเลือกแก้วที่ไม่ได้คุณภาพออกก่อนที่จะทำการบรรจุ แต่แก้วบางประเภทต้องนำไปทำการตกแต่งขั้นสุดท้ายก่อน เช่น การทำความสะอาด การขัดด้วยหินขัด, การขัดมัน, การตัด, การขัดผิวด้วยทรายละเอียด, การเคลือบอีนาเมล และอื่น ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน และความต้องการของผู้ใช้ หรือผู้ซื้อผลิตภัณฑ์ของแก้วนั่นเอง

