บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1. ข้าว

ข้าวมีชื่อทางพฤกษ์ศาสตร์ว่า *Oryza sativa* ซึ่งเป็นพืชในตระกูลหญ้า ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อกะเทาะเปลือกของข้าวเปลือกได้เป็นข้าวกล้อง ทำให้มีโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และพลังงาน ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีมากขึ้น แต่ทำให้ปริมาณเส้นใยหยาบ (crude fiber) เถ้า และเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้มีมากในแกลบ (เปลือกแข็งหุ้มเมล็ด) นั่นเอง (Chakraverty, 2003)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวเปลือกและส่วนที่ได้จากขัดสีที่ความชื้นร้อยละ 14

ส่วนของข้าว	โปรตีน (ก.)	ไขมัน (ก.)	เส้นใย (ก.)	เถ้า (ก.)	คาร์โบ-ไฮเดรต (ก.)	เส้นใยอาหาร (ก.)	พลังงาน (กิโลจูล)	พลังงาน (กิโลแคลอรี)
ข้าวเปลือก	5.8-7.7	1.5-.23	7.2-10.4	2.9-5.2	64-73	16.4-19.2	1,580	378
ข้าวกล้อง	7.1-8.3	1.6-2.8	0.6-1.0	1.0-1.5	73-87	2.9-3.9	1,520-1,610	363-385
ข้าวสาร	6.3-7.1	0.3-0.5	0.2-0.5	0.3-0.8	77-89	0.7-2.3	1,460-1,560	349-373
รำข้าว	11.3-14.9	15.0-19.7	7.0-11.4	6.6-9.9	34-62	24-29	670-1,990	399-476
แกลบ	2.0-2.8	0.3-0.8	34.5-45.9	13.2-21.0	22-34	66-74	1,110-1,390	265-332

ที่มา: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2551)

ส่วนข้าวสารที่ได้จากการขัดขาวมีปริมาณสารอาหาร คือ โปรตีน ไขมัน เส้นใยหยาบ เถ้า เส้นใยอาหาร รวมทั้งพลังงานลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวกล้องเพราะส่วนของเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด นิว-เซลลัส ชั้นแอลิวโรน รวมทั้งคัพภะหลุดออกไป ทำให้เมล็ดข้าวสารมีสีขาวขึ้นและมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณแร่ธาตุในข้าวข้าวเปลือกและองค์ประกอบที่ได้จากการสีข้าว แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดข้าวเปลือกและองค์ประกอบที่ได้จากการสีข้าว

แร่ธาตุ	ข้าวกล้อง	ข้าวขาว	ศัพภะ	รำหยาบ	รำละเอียด
ธาตุหลัก (มิลลิกรัม/กรัม ที่ความชื้นร้อยละ 14)					
แคลเซียม (Calcium)	0.1 – 0.5	0.1 – 0.3	0.2 – 1.0	0.3 – 1.2	0.5 – 0.7
แมกนีเซียม (Magnesium)	0.2 – 1.5	0.2 – 0.5	4 – 13	5 – 13	6 – 7
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	1.7 – 4.3	0.8 – 1.5	10 – 21	11 – 25	10 – 22
โพแทสเซียม (Potassium)	0.6 – 2.8	0.7 – 1.3	11 – 15	10 – 20	7 – 11
กำมะถัน (Sulphur)	0.3 – 1.9	0.8	...	1.7	1.6
ธาตุรอง (ไมโครกรัม/กรัม ที่ความชื้นร้อยละ 14)					
อลูมิเนียม	0.3 – 26	0.1 – 22	...	22	...
โคลรีน (Chlorine)	210 – 560	200 – 300	1,000	66	...
เหล็ก (Iron)	2.52	2.28	60 -180	86 – 430	43 – 155
แมงกานีส (manganese)	2.36	6 – 17	91–120	95 –230	...
โซเดียม (Sodium)	17 – 340	5 – 86	139–636	71 – 335	Tr – 138
สังกะสี (Zinc)	6 – 28	6 – 23	57–258	43 – 258	17 – 60
ซีลีเนียม (Selenium)	0.3	0.3	...	...	...

ที่มา: Juliano (1972)

1.1 องค์ประกอบของเมล็ดข้าว

ข้าว เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว (monocotyledon) อยู่ในวงศ์หญ้า (gramineae) เป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตทั้งในสภาพที่มีและไม่มีน้ำขัง (semi aquatic) โดยทั่วไปข้าวที่ปลูกเพื่อบริโภคมี 2 สายพันธุ์ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa L.* และ *O. glabberima* เมล็ดข้าวเปลือก (rough rice) เป็นผลประเภท caryopsis ที่มีเมล็ดเดี่ยว (single seed) ประสานรวมกันกับผนังรังไข่ (ovary wall) เมื่อเมล็ดพัฒนาสมบูรณ์และแก่เต็มที่ ผนังรังไข่จะกลายเป็นเยื่อหุ้มผล (pericarp) เมล็ดข้าวหรือผลของข้าวมีส่วนประกอบต่างๆ ดังภาพที่ 2.1 ได้แก่

1. แกลบ (hull หรือ husk) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มผลทั้งหมด หรือข้าวกล้อง (caryopsis) มีลักษณะเป็นเปลือกไม้แข็ง ผิวหยาบ แยกเป็นสองฝาประกบกันห่อหุ้มข้าวกล้องตามแนวยาว เรียกว่า เปลือกฝาใหญ่ (lemma) และฝาเปลือกเล็ก (palea) ขอบเปลือกทั้ง 2 ฝา มีลักษณะเป็นตะขอเกี่ยวกันทำให้สามารถควบคุมรูปร่างและขนาดของเมล็ดข้าว (David, 1972)

2. เยื่อหุ้มผล (pericarp) ภายในส่วนที่แกลบห่อหุ้มไว้ของเมล็ดข้าว เมื่อพัฒนาเต็มที่ จะปรากฏชั้นของเซลล์หลายชั้นห่อหุ้มส่วนในอยู่ชั้นเซลล์ต่างๆ ประกอบด้วยเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด (seedcoat หรือ tegmen) และนิวเซลลัส (nucellus) เยื่อหุ้มผลมีปริมาณร้อยละ 1-2 ของข้าว

กล้อง (caryosis) เป็นส่วนที่พัฒนามาจากผนังรังไข่ มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ประกอบด้วยเซลล์ที่มีผนังเป็น 6 ชั้น เยื่อหุ้มผลนี้ยังแบ่งเป็นเซลล์ชั้นนอก (epicarp) เป็นเซลล์ยาว เรียงตามขวางเป็นแถว ที่ขอบของปลายผนังเซลล์มีลักษณะเป็นรอยหยักเป็นคลื่น ถัดมาเป็นเซลล์ชั้นกลาง (hypoderm หรือ mesocarp) ซึ่งเป็นเซลล์ยาวเรียงตามขวางเช่นกัน แต่มีผนังเซลล์เรียบ ผนังเซลล์ของเยื่อหุ้มผลมีความหนาประมาณ 2 ไมครอน ประกอบด้วยสารโปรตีน (protein) เฮมิเซลลูโลส (hemlcellulose) และเซลลูโลส (cellulose) เยื่อหุ้มผลนี้มีสารสีอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ เช่น ขาวแดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และม่วงเกือบดำ ข้าวกล้องที่มีสีแดงและม่วงจะมีสารสีแอนโธไซยานิน (anthocyanin pigment) อยู่ สีข้าวกล้องมีความสำคัญในทางเศรษฐกิจ ดังในมาตรฐานข้าวชนิดดี (ข้าวขาวร้อยละ 100) จะไม่ยอมให้มีเมล็ดข้าวแดงปนอยู่เลย ในการทำข้าวนึ่งก็เช่นเดียวกัน ต้องการข้าวกล้องที่มีสีอ่อน เพราะข้าวกล้องที่มีสีเข้มเมื่อผ่านกระบวนการทำข้าวนึ่ง สารสีจะละลายน้ำและซึมเข้าไปในส่วนของเมล็ดข้าว ทำให้ข้าวสารมีสีเข้มแม้จะผ่านการขัดสีแล้วก็ตาม และไม่เป็นที่นิยมของผู้บริโภคบางกลุ่ม ในทางตรงข้าม มีผู้บริโภคอีกกลุ่มหนึ่งนิยมบริโภคข้าวกล้องสีดำ (ม่วง) และแดงเป็นครั้งคราว สำหรับเป็นอาหารสุขภาพ (health food) อย่างไรก็ตาม มีตลาดข้าวต่างประเทศนำเมล็ดข้าวกล้องสีแดงปนกับข้าวสารขาวจำหน่ายในตลาดเฉพาะกลุ่ม เพื่อทำให้ข้าวสวยมีสีสันเกิดขึ้น

3. เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seedcoat) ถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นชั้นเซลล์รูปยาว เรียงตามขวางและมีผนังบาง มีความหนาประมาณ 0.5 ไมครอน ในเซลล์มีไขมันอยู่ นอกจากนี้ ยังมีสารสีอยู่ และเช้นเดียวกับเยื่อหุ้ม ทำให้ข้าวกล้องมีสีสันแตกต่างกัน

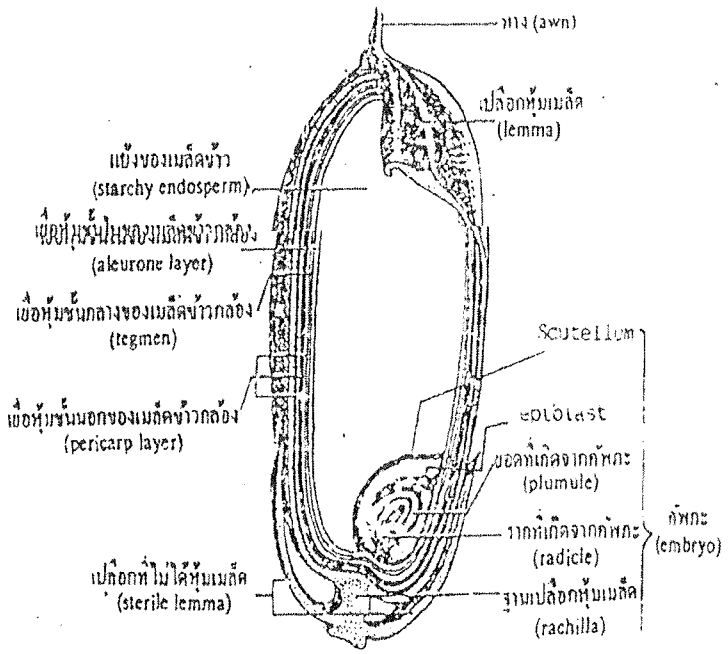
4. นิวเซลลัส (nucellus) ถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นนิวเซลลัส เมื่อเมล็ดพัฒนาเต็มที่นิวเซลลัสจะมีความหนาประมาณ 2.5 ไมครอน

5. คัพภะหรือเชื้อพันธุ์ (embryo หรือ germ) คัพภะหรือเชื้อพันธุ์อยู่ทางด้านท้องที่อยู่ใกล้ก้านผล มีขนาดเล็กมาก คิดเป็นน้ำหนัก 2-3% ของข้าวกล้องหรือผลข้าว ภายในประกอบด้วยต้นอ่อนที่จะเจริญต่อไปเป็นต้นข้าว ได้แก่ ยอดอ่อน (embryonic leave หรือ plumule) และรากอ่อน (embryonic primary root หรือ radicle) ที่เชื่อมต่อกันด้วยลำต้นสั้นๆ (hypocotyl) ยอดอ่อนถูกห่อหุ้มด้วยรากอ่อน (coleoptile) เพื่อทำหน้าที่ป้องกันยอดอ่อน ในขณะที่รากอ่อนได้รับการปกป้องด้วยเนื้อเยื่อนุ่มๆ ของเยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) แกนของคัพภะจะยึดติดกับ scutellum ที่จะพัฒนาเป็นใบเลี้ยง (cotyledon) ต่อไป ส่วนนอกของคัพภะจะยึดอลูโรนสำหรับเยื่อหุ้มรากอ่อน

6. เยื่ออลูโรน (aleurone layers) เป็นชั้นเซลล์ที่อยู่ใต้เยื่อหุ้มเมล็ด และทำหน้าที่ห่อหุ้มคัพภะและเอนโดสเปิร์ม โดยยึดติดแน่นกับเซลล์ชั้นนอกของเอนโดสเปิร์มและคัพภะ เยื่ออลูโรนประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น ภายในข้าวเมล็ดเยวกัน เยื่อทางด้านหลังผิวของเมล็ด (dorsal) ที่อยู่คนละด้านกับคัพภะมีจำนวนชั้นของอลูโรนมากกว่าทางด้านท้อง (ventral) ที่อยู่ด้านเดียวกับคัพภะและด้านข้าว (lateral) ที่อยู่ตามแนวความหนาของเมล็ด และความหนาของชั้นอลูโรนยังแตกต่าง

กันตามพันธุ์ ข้าวที่มีเมล็ดสั้นป้อมมักมีเยื่ออลูโรนมากกว่าข้าวนาสวน เซลล์ของเยื่ออลูโรนนี้มีเม็ดโปรตีน ที่ถูกห่อหุ้มด้วยชั้นไขมัน

7. เอนโดสเปิร์ม (endosperm) เป็นส่วนที่เป็นข้าวขาวหรือข้าวสาร ภายในประกอบด้วยเซลล์ที่มีผนังบาง (thin wall parenchyma cells) จัดเรียงกันตามแนวรัศมี เซลล์ที่เรียงกันมักมีรูปทรงยาว ข้าวที่มีเมล็ดยาวมักมีความยาวน้อยกว่าข้าวเมล็ดสั้น



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว (ข้าวสาร แกลบ จมูกข้าว และรำข้าว)
ที่มา: http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://ubn-rrc.ricethailand.go.th/

1.2 คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าว

แป้งข้าวเป็นองค์ประกอบหลักของเมล็ดที่เจริญและแก่เต็มที่ (Choct, 1997) เม็ดแป้งมีรูปทรงหลายเหลี่ยม (polyhedral) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 มีขนาด 2-9 ไมครอน ในข้าวจะมีแป้งอยู่มากถึง 90% โดยน้ำหนักแห้ง กลุ่มของเม็ดแป้งที่มีอยู่ในอะไมโลพลาส (amyloplast) จะมีรูปร่างกลมหรือรูปไข่มีขนาด 7-35 ไมครอน อะไมโลพลาสแต่ละอันจะมีเม็ดแป้งอัดกันอยู่ 20-60 เม็ด และล้อมรอบด้วยกลุ่มโปรตีน รอยเว้าที่เกิดบนผิวเม็ดแป้งแต่ละเม็ดอาจเกิดการหลุดไปของกลุ่มโปรตีน

ภาพที่ 2.2 เม็ดสตาร์ชของข้าวที่ส่องด้วยกล้องจุลทรรศ์

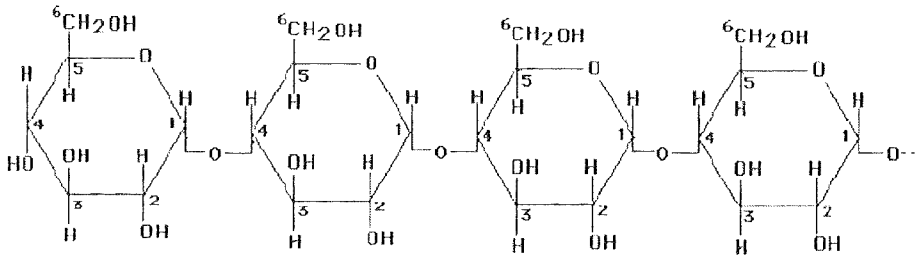
ที่มา: http://images.google.co.th/imgres?imgurl=http://chestofbooks.com/food/science/Food-Study/images

1.3 โครงสร้างและองค์ประกอบของสตาร์ชในเมล็ดข้าว

คาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวประกอบไปด้วย (1) ส่วนที่เป็นสตาร์ช (starch carbohydrate) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน และ (2) ส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ช (non-starch carbohydrate) ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส (hemicelluose) เซลลูโลส (cellulose) และเพคติน (pectin) เป็นต้น (Choct, 1997)

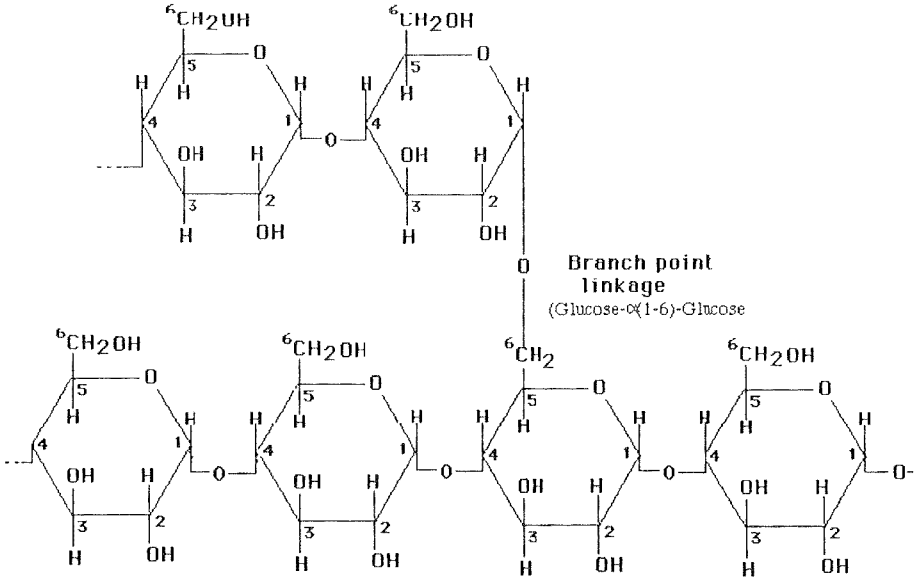
คาร์โบไฮเดรตที่สำคัญที่สะสมอยู่ในข้าวคือสตาร์ช (starch) องค์ประกอบที่สำคัญของสตาร์ชประกอบด้วย อะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีบทบาทมากที่สุดในการสลายตัว (hydrolysis) ของสตาร์ชโดยใช้เอนไซม์ โดยสัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินจะต่างกันไปตามชนิดของพืช เช่น ในแป้งข้าวเหนียวจะมีอะไมโลสเพียงร้อยละ 2 แต่จะมีอะไมโลเพคตินถึงร้องยละ 80 (พักตร์ประไพ และวิชัย, 2546)

สตาร์ชประกอบด้วยโพลิเมอร์พื้นฐาน 2 ชนิด คือ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน (Jirapa และคณะ, 2009) โดยมีอะไมโลสเป็นสายหลักที่ประกอบด้วยกลูโคสไม่เกิน 6,000 หน่วยที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α-1,4-ไกลโคซิดิก (α-1,4-Glycosidic linked) ดังภาพที่ 2.3 และส่วนที่เป็นอะไมโลเพคตินจะเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคส 10-60 หน่วยเชื่อมกันด้วยพันธะ α-1,4-ไกลโคซิดิก และพอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคส 15-45 หน่วยเชื่อมกันด้วยพันธะ α-1,6-ไกลโคซิดิก (พักตร์ประไพ และวิชัย, 2546; Chaplin, 2004) ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส

ที่มา: Chaplin (2001)



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

ที่มา: Chaplin (2001)

1.4 กลิ่นของข้าว

ข้าวขาวดอกมะลิ จะมีกลิ่นคล้ายใบเตย โดยความหอมของข้าวขาวดอกมะลิ เกิดจากสารระเหยชื่อ 2 acctyl-1-pyridine ซึ่งเป็นสารที่ระเหยหายไปได้ จากการศึกษาของ Mahatheeranont และคณะ(2001) ได้ทำการศึกษาข้าวขาวดอกมะลิ 105 และพบว่ามีสารละเหยที่สามารถสกัดด้วยไอน้ำและตัวทำละลายอยู่ถึง 140 ชนิดด้วยกัน จากสารละเหยทั้ง 140 ชนิดนั้น สาร 2-AP เป็นสารที่มีบทบาทมากในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในขณะที่ Yoshihashi, Huong และ Inatomi (2002) ได้ทำการศึกษาและพบว่าสาร 2-AP นั้นมีลักษณะเป็นของเหลวใสไม่มีสี สารไนโตรเจนที่อยู่ในโครงสร้างของ 2-AP นั้นมาจาก L-proline ในข้าว และเนื่องจากการที่สารนี้เป็นสารประกอบ

ไนโตรเจนจึงทำให้มีคุณสมบัติที่เป็นเบสเล็กน้อย อีกทั้งยังเป็นสารที่ระเหยได้ง่ายและไม่เสถียร Buttery (1983) ได้ศึกษาและพบว่าสาร 2-AP ที่ให้กลิ่นหอมนั้นมีลักษณะคล้ายใบเตย (*Pandanus amaryllifolius*) Yajima และ คณะ (1979) ทำการศึกษาเกี่ยวกับองค์ประกอบของกลิ่นข้าวหอมญี่ปุ่นพันธุ์ Kaorimai โดยนำมาเปรียบเทียบกับข้าวพันธุ์ที่ไม่มีกลิ่นหอมพันธุ์ Koshihikari ที่ผ่านการขัดข้าวในระดับร้อยละ 20 แล้วมาทำการตรวจสอบด้วย Gas Chromatography-Mass Spectrometer (GC-MS) พบว่าประกอบไปด้วยสารต่างๆ กว่าร้อยชนิด และเมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอมแล้วพบว่า ในข้าวที่มีกลิ่นหอมมีปริมาณสาร α- pyrrolidine สูงกว่าข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอม จึงสรุปได้ว่า α - pyrrolidine เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในความหอมของข้าวที่ให้กลิ่นหอม ส่วนข้าวที่ไม่มีกลิ่นหอมนั้นจะมี 4-vinylphenol, n-hexanol มากกว่าข้าวหอม

2. เครื่องจมูกอิเลคทรอนิคส์ (Electronic nose, E-nose)

เครื่องจมูกอิเลคทรอนิคส์ หรือเครื่องจมูกเทียม เป็นนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นมาในช่วงทศวรรษนี้ เพื่อใช้ในการตรวจวัดกลิ่นของวัตถุดิบ หรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้อย่างรวดเร็วแทนการทำงานของจมูกมนุษย์โดยให้ความแม่นยำสูง และสามารถเชื่อถือได้ เครื่องดังกล่าวยังเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดกลิ่นในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สที่เกิดในผลิตภัณฑ์ประเภทอาหาร หรือเครื่องดื่มก็ตาม อีกทั้งยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างของสารแต่งกลิ่น ในปัจจุบันเครื่องจมูกเทียมยังได้รับความนิยมไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องสำอาง ยา บรรจุภัณฑ์ พลาสติก และสารเคมี เป็นต้น

หากเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องจมูกเทียมกับจมูกของคน (biological nose) เป็นที่ทราบกันว่า การรับรู้กลิ่น (odor) ที่เราสัมผัสทางจมูกนั้นมีกลไกทำงานเริ่มต้นจากประสาทรับกลิ่นนั้นส่งรหัสสัญญาณตอบสนองต่อสารให้กลิ่นไปยังสมอง โดยสมองจะทำหน้าที่ประมวลผลตอบสนองนั้นจากความรู้สึกและประสบการณ์การเรียนรู้เพื่อที่จะจำแนกว่ากลิ่นที่สัมผัสนั้น คือกลิ่นอะไร ดีหรือไม่ หอมหรือเหม็น แต่หลายครั้งการจำแนกกลิ่นยังขึ้นกับความรู้สึกของผู้จำแนกด้วยว่าชอบหรือไม่ชอบ จากสาเหตุที่มีสภาวะอารมณ์และความรู้สึกเข้ามาเกี่ยวข้องกับการรับกลิ่นส่งผลให้จมูกของมนุษย์มีการตอบสนองต่อกลิ่นต่างๆในอาหารแตกต่างกันออกไป และบางครั้งเกิดความผิดพลาดในรับกลิ่น อีกทั้งมีกลิ่นบางอย่างที่คนเราก็ไม่สามารถจำแนกได้ เช่น แก๊สมีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น รวมทั้งไม่สามารถบอกถึงระดับปริมาณความเข้มของกลิ่น หรือแก๊สที่เป็นอันตราย หรือแก๊สพิษ แต่เครื่องจมูกเทียมสามารถใช้ในกรณีศึกษาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี

สำหรับกรณีของเครื่องจมูกเทียม กลิ่นหรือไอระเหย (volatile) จะผ่านเข้าสัมผัสกับส่วน sensor array ของเครื่องวัดกลิ่น และ sensor เหล่านั้นจะส่งสัญญาณ (signal) ผ่านไปยังระบบวิเคราะห์ เพื่อวัดสัญญาณเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทราบ (training) จากนั้นเครื่องจะประมวลผลให้เราทราบถึงชนิดประเภท หรือสารประกอบของกลิ่น และคุณภาพของกลิ่นว่าดีหรือไม่ หรือกลิ่นที่ทดสอบนั้นตรงตามมาตรฐานที่อ้างอิงหรือไม่ อย่างไร และระดับความเข้มข้นของกลิ่นที่วัดนั้นมีค่ามากหรือน้อยเท่าใด

จะเห็นได้ว่าการประยุกต์ใช้เครื่องจมูกเทียมในวงการอุตสาหกรรมมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบ ลดความผิดพลาดในการรับรู้กลิ่นเนื่องจากความแตกต่างของผู้ที่ทดสอบกลิ่น อีกทั้งยังสามารถให้ข้อมูลทั้งในแง่เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

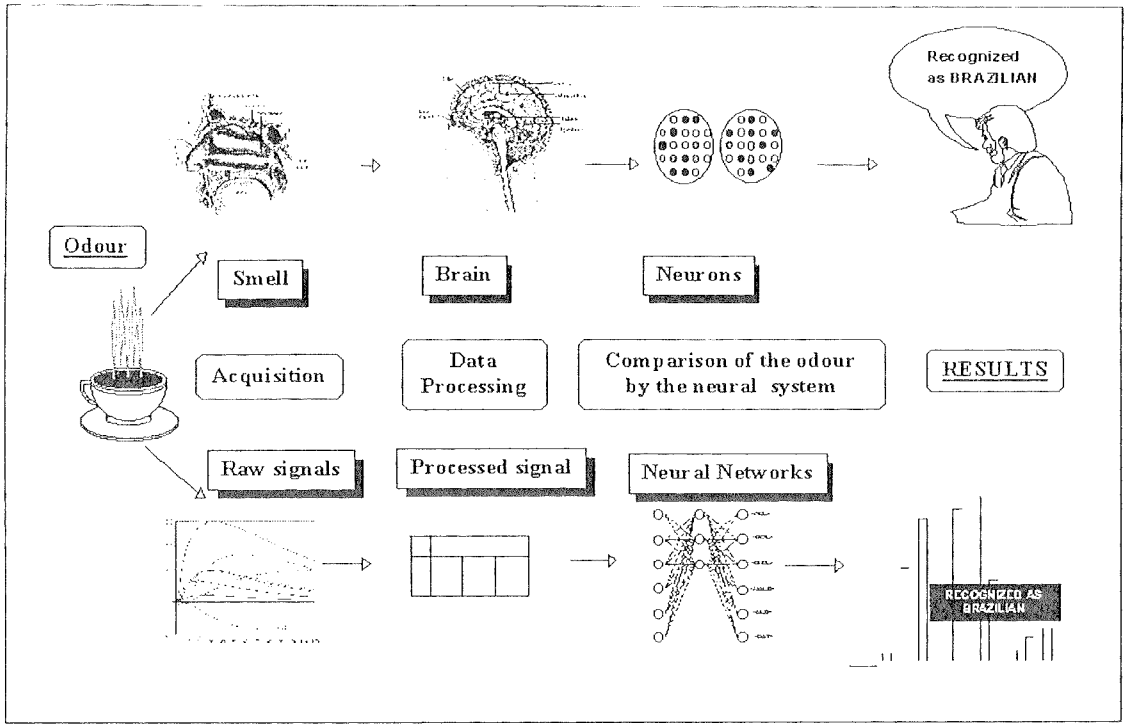
2.1 ความแตกต่างของระบบการรับรู้กลิ่นในมนุษย์กับเครื่องจมูกเทียม

ระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์นั้นได้รับการพัฒนามากกว่า 1,000 ปี ทั้งนี้ระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์นั้นจะประกอบไปด้วยบริเวณสำหรับการวิเคราะห์กลิ่นอยู่ 3 บริเวณหลักๆ คือ บริเวณรับสัญญาณกลิ่น (sensing) บริเวณแปลสัญญาณกลิ่น (processing of signal) และ บริเวณการจดจำกลิ่น (recognition)

ส่วนที่เป็นการรับสัญญาณกลิ่น คือส่วนของเซลล์ที่รับการดมกลิ่น (olfactory receptor cells) ส่วนที่เป็นการแปลสัญญาณกลิ่น คือ กระบวนการที่ทำหน้าที่แปลรหัสสัญญาณโดยใช้อวัยวะที่มีลักษณะคล้ายกระเปาะ และส่วนสุดท้ายคือส่วนของการจดจำกลิ่น คือส่วนของการรับรู้กลิ่นโดยมีสมองเป็นอวัยวะสำคัญในการจดจำกลิ่นต่างๆ

กระบวนการแปลสัญญาณนั้นเริ่มจาก เซลล์ที่ใช้รับการดมกลิ่นที่อยู่ในส่วนบนสุดของจมูกซึ่งมีโปรตีนบรรจุอยู่ ต่อมากลิ่นก็จะถูกนำเข้ามาสู่เซลล์ประสาทแล้วเข้าสู่กระบวนการรับรู้และจดจำเพื่อชี้บอกว่า กลิ่นเหล่านั้นคือกลิ่นอะไรและมีสารอะไรบ้างที่เป็นองค์ประกอบ ระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์สามารถแยกกลิ่นแต่ละกลิ่นได้แม้ว่าจะมีสารประกอบให้กลิ่นเป็นจำนวนมากมาย อย่างไรก็ตามเพื่อความแน่นอนระบบสัญญาณประสาทจะส่งไปยังอวัยวะรับรู้กลิ่นส่วนในซึ่งมีลักษณะเป็นกระเปาะซึ่งการทำงานของอวัยวะส่วนนี้จะมีหน้าที่ลดระดับสัญญาณลงแล้วจึงปรับความเข้มของสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความจำเพาะเจาะจง และง่ายต่อการจำแนกความแตกต่างของกลิ่น จากนั้นสัญญาณก็จะถูกส่งต่อไปยังสมองเป็นอันดับสุดท้ายที่จะมีการจำแนกกลิ่นและส่งไปยังประสาทเพื่อบอกว่าเป็นกลิ่นอะไร โดยมีพื้นฐานการตัดสินใจจากประสบการณ์ ถึงแม้ว่ากลิ่นจะมีองค์ประกอบที่หลากหลายแต่มนุษย์ก็สามารถจำแนกได้ว่าเป็นกลิ่นอะไร และแม้ว่าจะมีกลิ่นใหม่ที่ไม่เคยรู้มาก่อน แต่มนุษย์ก็สามารถจดจำกลิ่นนั้นเอาไว้ได้ใหม่อีกด้วย ภาพที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบการทำงานของจมูกมนุษย์และเครื่องจมูกเทียม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 11 มิ.ย. 2555
เลขทะเบียน 243125



ภาพที่ 2.5 การจำแนกกลิ่นของมนุษย์และเครื่องจมูกเทียม

ถึงแม้ว่าการทำงานของระบบแปลสัญญาณของระบบประสาทมนุษย์และเครื่องจมูกเทียมจะทำงานได้คล้ายคลึงกันแต่การวิเคราะห์กลิ่นของมนุษย์กับเครื่องจมูกเทียมก็ยังมีส่วนที่แตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เพราะเครื่องจมูกเทียมนั้นจะสร้างจากหลักการพื้นฐานของระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์เท่านั้น หากแต่ระบบการรับรู้กลิ่นของเครื่องจมูกเทียมนั้นจะเป็นการวิเคราะห์จากการคำนวณความแตกต่างทางสถิติที่จะต้องอาศัยการฝึกฝน สำหรับกลิ่นที่ไม่เคยตรวจเสียก่อนจนกว่าเครื่องจะสามารถจดจำกลิ่นต่างๆได้

จากการเปรียบเทียบระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์ กับเครื่องจมูกเทียมจะเห็นได้ว่า ระบบการรับรู้กลิ่นทั้งสองระบบ จะมีตัวตรวจวัดซึ่งทำการตรวจวัดกลิ่น โดยในระบบของมนุษย์จะมีตัวตรวจวัดซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงมากโดยในระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์จะใช้โปรตีน แต่ในส่วนของเครื่องจมูกเทียมนั้นจะมีตัวตรวจสอบได้หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีความไวต่อการจำแนกสารได้แตกต่างกันไปตามความจำเพาะของสารแต่ละชนิดซึ่งมีการตอบสนองต่อสารเคมีที่ระเหยได้แตกต่างกันตามกระบวนการทางเคมีของสารนั้นๆ ทั้งนี้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น พื้นที่ผิว หรือ ขนาดโมเลกุล เป็นต้น

ในเครื่องจมูกเทียม กระแสสัญญาณจะถูกควบคุมโดยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเมื่อได้รับสัญญาณแล้วในเบื้องต้นจะมีการปฏิบัติต่อข้อมูล เป็นกระบวนการที่ทำกับสัญญาณที่จะเข้ามา มีการอธิบายลักษณะที่สำคัญของสัญญานอย่างรวบรัด กระบวนการดังกล่าวเปรียบได้กับ

กระบวนการทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นในระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์ และจากนั้นระบบข้อมูลก็จะถูกพาเข้าไปในส่วนที่เป็นระบบของการจดจำซึ่งใช้ในการควบคุมและแยกธรรมชาติของกลิ่นต่างๆ ตามองค์ประกอบของชนิดนั้นๆ ที่จะมีความสัมพันธ์กับข้อมูลของสัญญาณที่มาจากกลิ่นของตัวอย่าง ในส่วนนี้เมื่อเทียบกับระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์แล้วจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกัน

ในระบบของมนุษย์นั้นจะใช้ประสบการณ์เป็นเทคนิคของการจดจำกลิ่นได้ จากนั้นก็จะนำข้อมูลที่ได้เข้าสู่เซลล์ที่รับข้อมูลโดยข้อมูลที่ถูกส่งมานั้นจะมีความสัมพันธ์กับสัญญาณของกลิ่น ในส่วนของการจดจำของเครื่องจมูกเทียมนั้น กระบวนการส่งสัญญาณและทำการจดจำสารประกอบของข้อมูลจะเป็นตัววิเคราะห์ของสารประกอบเชิงซ้อนโดยจะใช้การเปรียบเทียบกับข้อมูลเก่าซึ่งจะใช้การเปรียบเทียบจากตัวที่องค์ประกอบเหมือนกันตามความจำเพาะต่างๆ ของกลิ่นนั้นๆ

ด้วยเหตุนี้เครื่องจมูกเทียมจึงสามารถใช้เทคนิคทางสถิติที่หลากหลายในการจำแนกความแตกต่างของความสัมพันธ์ของข้อมูลทั้งสอง การวิเคราะห์ข้อมูลนั้นส่วนมากจะทำด้วยการเลียนแบบมาจากระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์ แต่เครื่องจมูกเทียมจะมีความได้เปรียบมากกว่าระบบการรับรู้กลิ่นของมนุษย์ในเรื่องของการจำแนกความแตกต่างของกลิ่น

2.2 การเริ่มใช้เครื่องจมูกเทียมในอุตสาหกรรมอาหาร

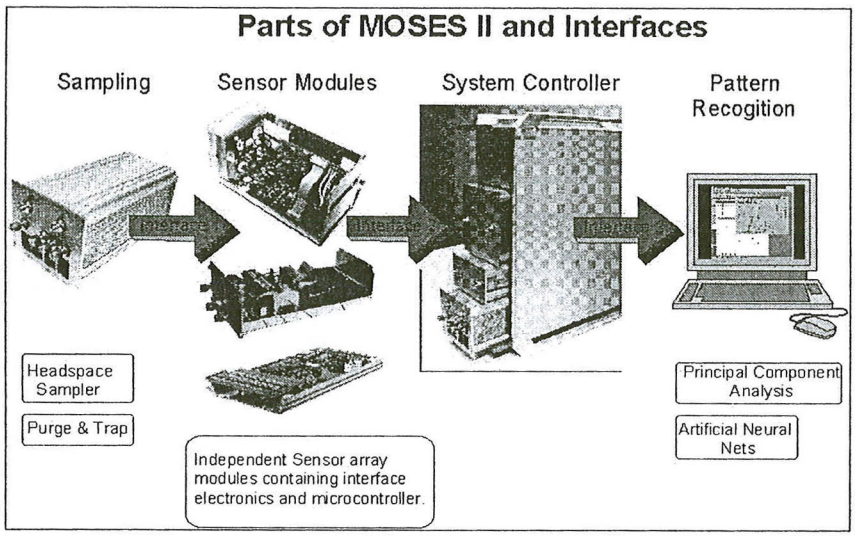
ปัจจุบันโรงงานอาหารได้ประยุกต์ใช้เครื่องจมูกเทียมร่วมกันกับเครื่องมือต่างๆ ในกระบวนการผลิตทั้งที่เป็นแบบต่อเนื่องและแบบกึ่งต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบตัวอย่างอาหารที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก อีกทั้งไม่สิ้นเปลืองตัวอย่างในการวิเคราะห์โดยนำเครื่องจมูกเทียมไปใช้ในการทดสอบคุณภาพของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์สุดท้าย การควบคุมกระบวนการผลิต และตรวจสอบความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหารนั้นๆ

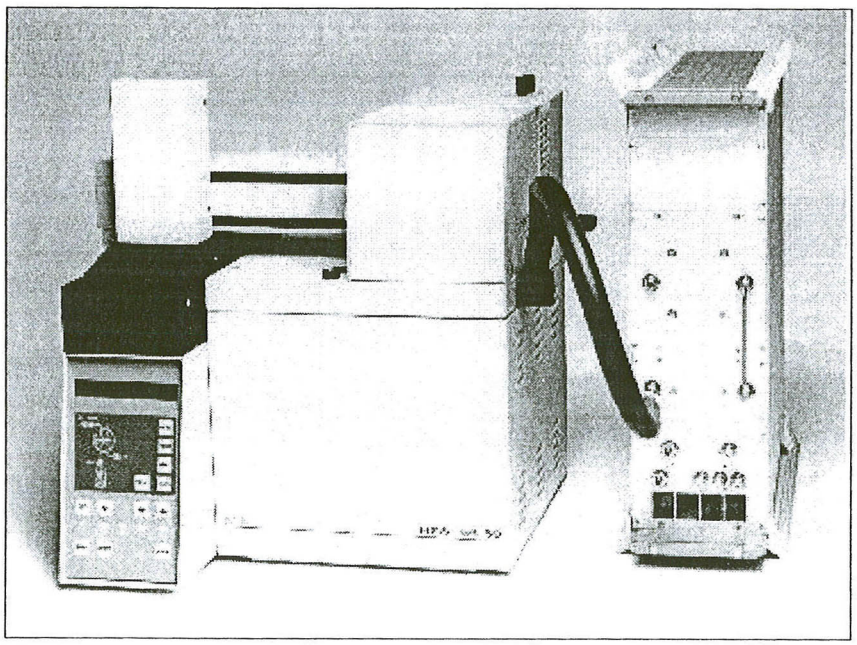
ในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นกระบวนการหมัก ปิ้ง ย่าง หรือการผสม แต่ละกระบวนการบางครั้งมีความจำเป็นที่ต้องการตรวจสอบคุณภาพทางด้านกลิ่นทั้งสิ้น ซึ่งเทคนิคของเครื่องจมูกเทียมนั้นสามารถประยุกต์ใช้เป็นกรณีพิเศษสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมอาหารที่หันมาใช้เครื่องจมูกเทียมเพื่อช่วยในการเพิ่มปริมาณการผลิตให้สูงสุด และควบคุมคุณภาพกลิ่นในผลิตภัณฑ์อาหารให้คงที่ เช่น กลิ่นที่มีอยู่ในเครื่องเทศต่างๆ และสารแต่งกลิ่นที่ใส่ลงในอาหาร เป็นการประหยัดต่าใช้จ่ายในการตรวจสอบลงได้ ในปัจจุบันนี้เครื่องจมูกเทียมจะนิยมใช้กันมากในแผนกวิจัยและพัฒนา สำหรับหาสูตรอาหาร และปรับปรุงกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์อาหารให้ตรงกับความต้องการของลูกค้า พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการเติมสารให้กลิ่นชนิดใหม่ลงในสูตร

2.3 ส่วนประกอบของเครื่องจมูกเทียม

เครื่องจมูกเทียมประกอบด้วย ส่วนประกอบต่างๆมากมาย ดังแสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง MOSES II ในภาพที่ 2.6 ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์ชนิดนี้ออกแบบระบบ

ให้ใช้ได้ในระยะยาว แต่สามารถวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบกลิ่นตัวอย่างได้ในระยะเวลาอันสั้น อีกทั้งสามารถหาปริมาณความแตกต่างของกลิ่นตัวอย่าง เทคโนโลยีของเครื่องมือนี้มักใช้กับการวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหาร เมื่อมีการตรวจสอบในกระบวนการแล้วก็จะมีการแปรผลออกมาในรูปของค่าสถิติ ซึ่งทำให้เครื่องจมูกเทียมสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์อาหารได้เป็นอย่างดี องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่องจมูกเทียม คือ ส่วนที่เป็น hardware และ software โดยในส่วนแรกคือส่วนที่ใช้ในการเตรียมสาร และส่วนที่สองคือส่วนของ sensor ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป และส่วนสุดท้ายเป็นส่วนของการแปลผล





ภาพที่ 2.6 ส่วนประกอบของเครื่อง MOSESII with headspace sampler

2.4 เซนเซอร์ (Sensors)

sensor ทุกชนิดจะทำหน้าที่แสดงผลกระทบของแก๊สที่วัดได้ ซึ่งอาจเป็นผลกระทบทางฟิสิกส์หรือทางเคมีที่เกิดจากสารประกอบระเหยผ่าน sensor แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของสารประกอบที่ระเหยนั้นที่ผิวของ sensor

2.5 หลักการของ sensor ในเครื่องจมูกเทียม

sensor ที่มีความว่องไวสูงจะใช้ตรวจวัดสารประกอบเคมีของกลิ่นโดยทำหน้าที่คล้ายกับจมูกของคน แต่ sensor ที่ว่องไวน้อยจะใช้กับสารให้กลิ่นที่มีความแปรปรวนเนื่องจากความชื้นและอุณหภูมิเป็นส่วนใหญ่ ส่วน sensor ที่ว่องไวปานกลางจะใช้กับสารประกอบที่มีอยู่ใน headspace sensor ชนิดนี้จะมีความเสถียรสูง มีความน่าเชื่อถือ มีปฏิกิริยาสั้น มีความแข็งแรงและคงทน ง่ายต่อการปรับ ง่ายต่อข้อมูลที่ส่งออก (output data) ของกระบวนการที่มีขนาดเล็ก

sensor ที่ออกแบบเพื่อจุดประสงค์สำหรับใช้ในโรงงานอาหารโดยเฉพาะในระบบ online นั้นควรจะเป็น sensor ที่ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความปลอดภัยสูงและมีราคาต่ำ โดยส่วนมากโรงงานส่วนใหญ่มักจะมองหา sensor ที่มีความว่องไวสูง ในกรณีของเครื่องจมูกเทียม สารประกอบทุกชนิดที่อยู่ในแก๊สจะถูกตรวจสอบโดย sensor อย่างน้อยหนึ่งตัว ถ้ามีสารประกอบตัวใหม่ถูกเติมในสารผสมจะต้องเพิ่ม sensor อย่างน้อยอีกหนึ่งตัวเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้มากขึ้นด้วย แต่ถ้าหากใช้ sensor จำนวนมากเกินไปก็อาจนำไปสู่ระบบที่มากเกินความจำเป็น ทำให้ราคาเครื่องที่ใช้สูงเกิน

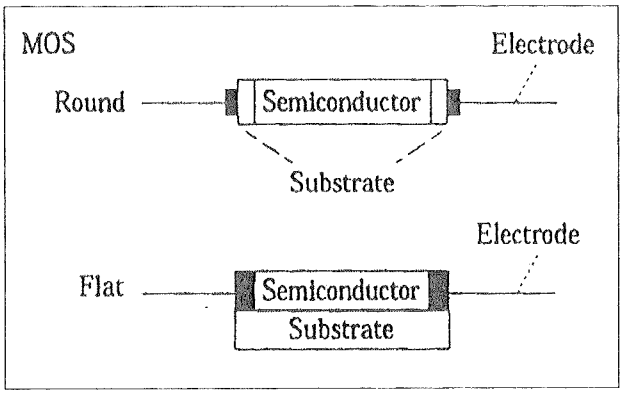
ตัว sensor สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ hot และ cool โดยตัว sensor ที่สามารถทำงานได้ดีในอุณหภูมิสูง ตัวอย่างเช่น MOS ส่วน sensor ที่ทำงานได้ดีในอุณหภูมิต่ำ เช่น CP SAW และ BAW

1. Metal oxide gas sensors (MOS) – Metal oxide gas sensors (ภาพที่ 2.7) ได้มีการพัฒนาขึ้นในปี 1971 โดยนายทากูชิ ตัว sensor ชนิดนี้ในทางอุตสาหกรรมนั้นจะทำจากเซรามิกส์ และมีการเคลือบด้วยฟิล์มกึ่งตัวนำซึ่งใช้ดีบุกออกไซด์เป็นตัวเคลือบ ตัวฟิล์มนี้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้โลหะเปลี่ยนไปเป็นสเปกตรัม (spectrum) เพื่อให้ง่ายต่อการแยกชนิดของสารประกอบเคมีแต่ละสารที่มีในกลิ่นทดสอบ ปัจจุบันได้พัฒนาให้ sensor ชนิดนี้สามารถทำตรวจสอบได้ในที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50–400 องศาเซลเซียส ดังนั้นชนิดของตัว sensor แต่ละตัวที่ใช้ในเครื่องควรมีความไวในการทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีแต่ละตัวที่ไม่เท่ากันทั้งนี้เพื่อที่จะได้ครอบคลุมสารเคมีชนิดต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของกลิ่นที่ทดสอบ และในที่สุดสามารถที่จะจำแนกชนิดของกลิ่น โดยหลักการแล้วผลตอบสนองทางเคมีของกลิ่นที่มีต่อ sensor จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสื่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

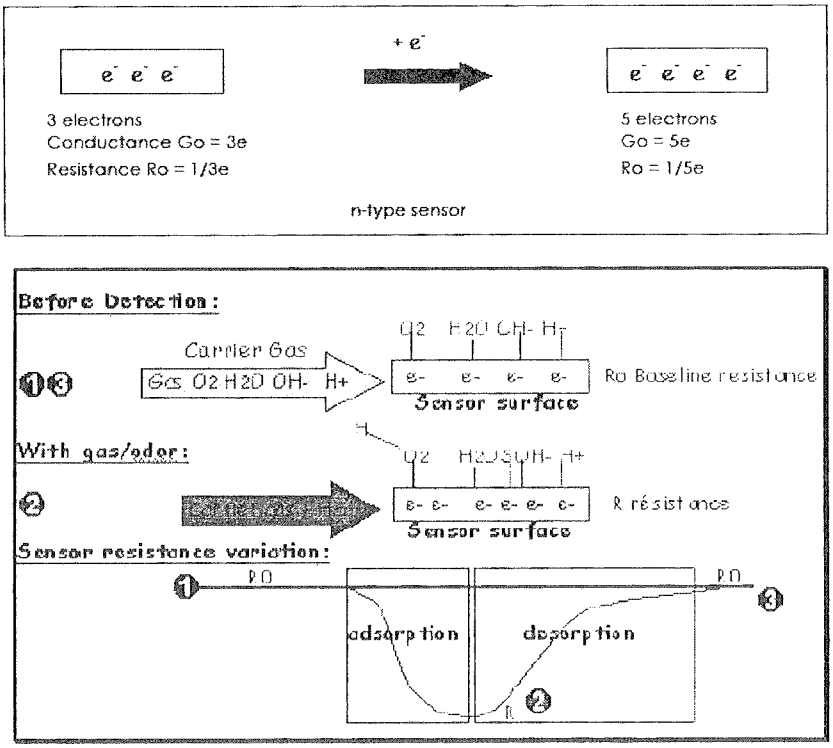
ชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีอยู่ 2 ชนิด คือ n–type semiconductors (Zinc, iron oxide) ใช้ในปฏิกิริยา reducing compound อีกชนิดคือ p–type semiconductors (Nickel, Cobalt oxide) ใช้กับปฏิกิริยา oxidizing compound ตัว sensor จะนำออกซิเจนจากอากาศเข้ามา ออกซิเจนจะสามารถ

จับกับอิเล็กตรอนอิสระจากการนำพาของฟิล์ม จึงทำให้ความเป็นตัวนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 2.8) และจะลดลงเมื่อมีการเข้าร่วมกับ reducing gas เพื่อทำปฏิกิริยาการดูดซับออกซิเจน (Mielle,1996)

sensor ชนิดนี้มีความสามารถในการตรวจจับสารให้กลิ่นได้เป็นอย่างดีเนื่องจากมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูง โดยเฉพาะตัวอย่างทดสอบที่มีความแปรปรวนเนื่องจากความชื้น และมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของตัวอย่างได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือ มักทำงานช้า และทำงานได้ไม่ดีในสารที่มีองค์ประกอบขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก

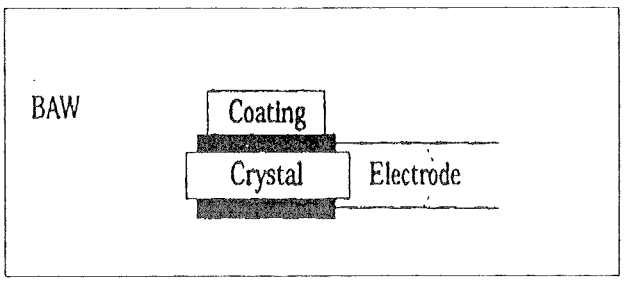


ภาพที่ 2.7 Metal oxide semiconductor sensors



ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของ Metal oxide semiconductor sensors

2. Piezoelectric crystals (Bulk acoustic wave sensor; BAW sensors) - Piezoelectric crystals (ภาพที่ 2.9) มักทำจากควอตซ์ (quart) ซึ่งมีความทนทานต่อเสียงก้องของคลื่นวิทยุได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะเมื่อยามที่มีการเพิ่มระดับของคลื่นเสียงภายในตัว crystal ตามปกติชนิดของ crystal ที่ใช้ในเครื่องนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่หรือเวลาที่ใช้อ้างอิง Piezoelectric crystals นี้จะถูกเคลือบด้วยตัวเคลือบที่ว่องไวสูงโดยมีความหนาประมาณ 2-3 ไมโครเมตร ซึ่งตัวเคลือบที่ใช้จะต้องมีความทนต่อสารเคมีและความร้อน ปกติแล้ว Piezoelectric crystals จะมีหลักการง่ายๆ คือ เมื่อปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ หรือมวลของสารประกอบกลิ่นที่ทดสอบ เกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ความถี่ของคลื่นเสียงที่ตอบสนองเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสารประกอบกลิ่นถูกดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของตัวเคลือบก่อให้เกิดการสะท้อนของคลื่นเสียงที่ความถี่ต่างๆ อีกทั้งระดับของความถี่สะท้อนก็เปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงทั้งความถี่และระดับของความถี่สะท้อนล้วนมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของสารประกอบกลิ่นต่างๆ แต่ถึงอย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นสูง ๆ การเปลี่ยนแปลงจะสวนทางกับระดับของความถี่สะท้อนจึงมีความจำเป็นต้องใช้วิธีอื่นในการทดสอบแทน ความว่องไวของตัว sensor ชนิดนี้จะสัมพันธ์กับกระบวนการให้ความถี่ โดยทั่วไปจะให้ความถี่ในช่วง 10 ถึง 30 เมกะเฮิร์ท ส่วนมากจะใช้ในการวัดความจำเพาะของแก๊ส และวิธีเลือกใช้นั้นจะขึ้นกับจำนวนองค์ประกอบของสารประกอบกลิ่น การใช้ sensor ชนิดนี้จึงยากในการควบคุมไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ หรือความชื้นของแก๊สเองก็ตาม (Mielle,1996)

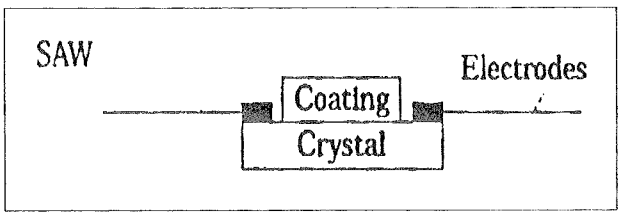


ภาพที่ 2.9 Piezoelectric crystal sensors (Balk acoustic wave; BAW sensors)

3. Surface acoustic wave (SAW) sensors - กระบวนการหลัก ๆ ของ SAW (ภาพที่ 2.10) และ BAW จะมีความคล้ายกันเว้นแต่ในกรณีของ SAW การเปลี่ยนคลื่นความถี่วิทยุจะเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงจากสนามไฟฟ้า สร้างขั้วไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของ sensor และจะไม่เข้าไปข้างใน การใช้ความถี่ในช่วงตั้งแต่ 100-1000 เมกะเฮิร์ท สื่อนำของคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงโดย

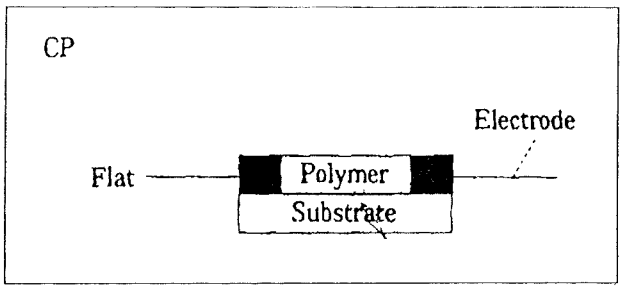
เข้าร่วมในการดูดซับโมเลกุลของตัวอย่างบนตัว sensor ด้วย การเปลี่ยนแปลงความถี่จะสัมพันธ์กับจำนวนของการดูดซับของตัวอย่างที่บนชั้นผิวหน้าของ sensor

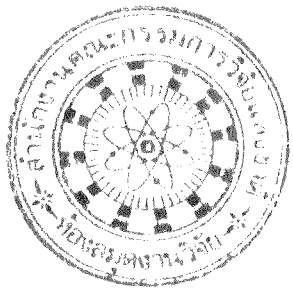
ในส่วนของตัว sensor ซึ่งมักจะทำจากควอตซ์ (quart) หรือลิเธียม (lithium) มักจะเคลือบโดยตัวเคลือบ 2 ชนิด ซึ่งมักจะทำจากอลูมิเนียม โดยมีคุณสมบัติในการแพร่และการสะท้อนคลื่น โดยชนิดแรกใช้ในการเป็นตัว sensor และอีกชนิดหนึ่งจะใช้เป็นตัวอ้างอิง โดยในระบบของตัวอ้างอิงของตัว sensor ชนิดนี้จะคล้ายกับการเปลี่ยนรูปของสารซัลเฟอร์ ความไวของ sensor ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการของการให้คลื่นความถี่ คือ ความถี่ของคลื่นเสียงที่ใช้ต้องมีความถี่สูงและมีความสัมพันธ์ของสัญญาณไฟฟ้า สำหรับการผลิต sensor ชนิดนี้นั้นจะใช้สาร ซิลิคอน (silicon) ที่มีราคาแพง เพราะว่าจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการที่มีความถี่สูงมาก เพราะในการผลิตแต่ละครั้งต้องมีการควบคุมเพื่อให้ในกระบวนการมีความผิดพลาดของผลผลิตน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (Mielle,1996)



ภาพที่ 2.10 Surface acoustic wave (SAW) sensors

4. Conducting organic polymer (CP) – Conducting organic polymer sensors (ภาพที่ 2.11) ได้มาจากกระบวนการ Electro polymerization โดยให้ฟิล์มของพอลิเมอร์ไปเกาะตัวอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรด (electrode) ที่ทำจากทอง ความสามารถในการนำไฟฟ้าของฟิล์มจะขึ้นอยู่กับชนิดโมเลกุลที่ดูดซับอยู่บนพื้นผิวนั้น โดยมากแล้วพอลิเมอร์จะมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน การตอบสนองของ sensor นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับความยาวและขนาดของฟิล์มพอลิเมอร์ และใช้ได้ดีกับตัวอย่างของสารประกอบที่เป็นขั้ว โดยทั่วไป sensor จะประกอบอยู่ในรูปแบบของพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน แล้วแต่ละขนาดโมเลกุล โดยส่วนใหญ่ที่นิยมใช้มักจะมีขนาดเล็กมาก เช่น ประกอบด้วย sensor ถึง 32 ตัว อยู่บนผิวหน้าแค่ 2-3 ตารางไมโครเมตร ข้อได้เปรียบของ sensor นี้ คือสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง อย่างไรก็ตาม การใช้เวลาวัดจะนานอยู่ในช่วงประมาณ 20-40 วินาที และมีข้อเสียในการตรวจสอบเมื่อใช้วิเคราะห์ผลซ้ำๆ โดยจะใช้เวลามากขึ้นและอุณหภูมิภายในก็จะสูงขึ้น (Mielle,1996)





ภาพที่ 2.11 Conducting organic polymer sensors (CP)

3. Gas chromatography (GC), Gas chromatography/Mass spectrometer (GC/MS) และ Solid-phase microextraction

3.1 Gas chromatography (GC)

GC เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารที่มีมาช้านาน เพื่อใช้ในการแยกและวิเคราะห์สารระเหยที่มีมวลโมเลกุลระหว่าง 2-1000 ดาลตัน ซึ่งสามารถเลือกใช้คอลัมน์ในการวิเคราะห์สารได้หลายแบบ แต่ที่นิยมมากที่สุดคือ capillary column เนื่องจากเป็นคอลัมน์ที่ให้ผลที่แม่นยำสูงและสามารถแยกสารออกจากกันได้ดีเนื่องมี sensitivity สูง โดยสามารถแยกสารที่มีความแตกต่างกันได้มากกว่า 450 ชนิด สำหรับ detector ที่นิยมใช้คือ flame ionization detector โดยสามารถตรวจจับสารได้ระดับความเข้มข้นเพียง 50 ppb

Gas Chromatography เป็นเทคนิคที่ใช้ก๊าซเป็นเฟสเคลื่อนที่ ซึ่งนิยมใช้ในการวิเคราะห์สารอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและสามารถทำได้อย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น ในบางครั้งเพียงระดับนาที วิธีการนี้เป็นวิธีการแยกสารที่อาศัยการแบ่งละลายระหว่างสารตัวอย่างใน 2 เฟส คือ เฟสคงที่ (stationary phase) ที่มีพื้นที่ผิวขนาดใหญ่เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารตัวอย่างได้ดีและเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่จะเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ที่เคลือบด้วยเฟสเคลื่อนที่ ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์อาจเรียกว่า solute หรือ analyte วิธีการนี้คือ การแยกสารออกจากกันโดยอาศัย relative vapor pressure และ affinity ของสารตัวอย่างต่อเฟสคงที่ เรียกว่า chromatography elution process

ตามนิยาม IUPAC โครมาโตกราฟฟีเป็นวิธีการทางกายภาพที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบโดยอาศัยหลักการแบ่งละลายระหว่าง 2 เฟสคือเฟสคงที่และเฟสเคลื่อนที่ โดยฉีดสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ที่มีเฟสเคลื่อนที่ไหลผ่านตลอดเวลา ชื่อที่ใช้ในการเรียกชนิดโครมาโตกราฟฟีจะเป็นไปตามสถานะของเฟสเคลื่อนที่ตามด้วยเฟสคงที่ตัวอย่างเช่น Gas-Liquid chromatography คือโครมาโตกราฟฟีที่มีเฟสเคลื่อนที่เป็นก๊าซและเฟสคงที่เป็นของเหลว

การพิจารณาว่าสารตัวอย่างใดจะออกมาจากคอลัมน์ก่อนสามารถพิจารณาได้จากกฎเคมีที่ว่า "Like Dissolved Like" กล่าวคือสารที่มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกันจะดึงดูดกัน ดังนั้นเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้เฟสคงที่และเฟสเคลื่อนที่มีความเป็นขั้วต่างกัน ตัวอย่างที่สามารถแบ่งละลายในเฟสเคลื่อนที่ได้ดีกว่าจะถูกเฟสเคลื่อนที่ชะออกจากคอลัมน์ช้ากว่าอีกตัวอย่างที่สามารถแบ่งละลายในเฟสเคลื่อนที่ได้ดีกว่า ตัวอย่างเช่นถ้าหากเฟสเคลื่อนที่คือคอลัมน์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารไม่มีขั้ว และใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นก๊าซฮีเลียม สารตัวอย่างใดที่ความไม่เป็นขั้วก็จะใช้เวลาอยู่ในคอลัมน์นาน เนื่องจากสามารถแบ่งละลายในเฟสคงที่ดีนั่นเอง นอกจากนี้การแยกสารแต่ละชนิดในตัวอย่างออกจากกันยังต้องอาศัย relative solubility ต่อเฟสคงที่และ relative vapor pressure ของตัวอย่างอีกด้วย

ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จาก Gas chromatography นั้นได้จาก detector โดย data system จะทำหน้าที่ประมวลผลจาก analog เป็น Digital (A-to-D) ได้ผลมาในรูปแบบกราฟที่รายงานเป็น retention time และพื้นที่ใต้พีคเรียกว่า chromatogram ข้อดีของ GC คือเป็นการวิเคราะห์ที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็วในระดับนาที มีประสิทธิภาพ มีความแม่นยำสูง (ค่า RSD 1-5%) มีความไวต่อการวิเคราะห์ (วิเคราะห์ได้ในระดับ ppm ถึง ppb) ใช้ปริมาณตัวอย่างน้อย (ไมโครลิตร) เชื่อถือได้และเสียค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก

ค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพในการแยกสารประกอบออกจากกันคือจำนวนเพลท (number of theoretical plates) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอลัมน์ชนิด capillary column ที่มีจำนวนเพลทหลายแสนเพลท โดยปกติแล้วการวิเคราะห์จะต้องใช้ temperature program ในการแยกสารที่มีจุดเดือดแตกต่างกันออกจากกัน อย่างไรก็ตามเทคนิค GC มีข้อเสียคือ จำกัดปริมาณสารระเหยตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์โดยทั่วไปไม่เหมาะกับตัวอย่างที่ไม่ทนต่อความร้อน ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างมีความยุ่งยากและต้องอาศัยเครื่อง spectroscopy ในการจำแนกสาร

หัวใจหลักของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้คือคอลัมน์ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อื่นๆก็มีความสำคัญเช่นกันนั่นคือ carrier gas, flow controller, oven, injector, detector และ data system คอลัมน์ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ fused silica & open tubular column ชนิด capillary column เนื่องจากเป็นคอลัมน์ที่ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ไม่นานนักอีกทั้งยังมีความไวต่อการวิเคราะห์อีกด้วย นอกจากนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอื่นๆ คือเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่าง อุณหภูมิของ injector port ต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้สารตัวอย่างเกิด chemical rearrangement แต่ก็ไม่ควรต่ำเกินไปเนื่องจากจะทำให้สารตัวอย่างระเหยไม่หมด

สภาวะที่ใช้การวิเคราะห์ควรใช้เป็นสภาวะเดียวกันทุกครั้งหากต้องการเปรียบเทียบผลที่วิเคราะห์ออกมาได้ เนื่องจากแม้จะใช้คอลัมน์และก๊าซชนิดเดียวแต่หากเราเปลี่ยนอุณหภูมิของคอลัมน์ให้สูงมากขึ้นจะส่งผลให้ retention time ของสารที่วิเคราะห์มีค่าต่ำลง คอลัมน์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ capillary column ที่ภายใน fused silica tube เคลือบด้วยฟิล์มของเหลวบางๆที่มี

ความหนา 0.25 มิลลิเมตร เรียกว่า wall-coat open tubular (WCOT) การที่ปลายของคอลัมน์เปิดออกส่งผลให้เกิดแรงต้านทานจากการไหลต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพการแยกดีขึ้นควรใช้คอลัมน์ที่มีขนาดยาว นอกจากนี้ยังควรคำนึงถึงอุณหภูมิของ detector เนื่องจากถ้าหากใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปจะก่อให้เกิดการควบแน่นของตัวอย่างใน detector ทำให้พีคกว้างและพีคบางส่วนหายไป

ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์จำเป็นต้องคำนึงเสมอว่าเทคนิค GC เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์สารระเหยเท่านั้น แต่โดยธรรมชาติของตัวอย่างแล้วจะมีทั้งสารที่ระเหยและสารที่ไม่ระเหยอยู่ปะปนกันไป ซึ่งสารที่ไม่สามารถระเหยได้จะไม่สามารถฉีดเข้าสู่คอลัมน์ได้ เนื่องจากจะส่งผลให้คอลัมน์เกิดความเสียหาย ดังนั้นขั้นตอนการเตรียมตัวตัวอย่างต้องมีประสิทธิภาพพอที่จะแยกสารระเหยออกจากสารไม่ระเหยได้ ซึ่งมีอยู่หลายวิธีการด้วยกันคือ Liquid-Liquid extraction, Solid Phase Extraction (SPE), Solid Phase Microextraction (SPME), Supercritical Fluid Extraction (SFE)

Headspace Sampling เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย โดยการบรรจุตัวอย่างลงในภาชนะปิดสนิท จากนั้นให้ความร้อน ณ สภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาที่กำหนด (ภาพที่ 2.12) จากนั้นสารระเหยจะแบ่งละลายใน sample phase และ gas phase จนถึงสภาวะสมดุล โดยระยะเวลาที่ทิ้งให้ตัวอย่างถึงจุดสมดุลต้องเพียงพอให้สารระเหยทั้งหมดออกมาจากตัวอย่าง ขั้นตอนต่อมาคือการเก็บสารระเหยที่อยู่ใน gas phase ฉีดเข้าสู่คอลัมน์เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

SPME เป็นเทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบใหม่ที่ทำได้ง่ายและไม่ต้องตัวทำละลายสกัดตัวอย่างออกจากfood matrix โดยใช้ nonpolar fiber ไฟเบอร์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือdimethylpolysiloxane เพื่อใช้ในการสกัดสารที่ต้องการวิเคราะห์ออกจาก polar matrix (โดยทั่วไปคือเฟสน้ำ) แกนไฟเบอร์ทำจาก fused silica ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางๆของเฟสเคลื่อนที่ (7, 30 หรือ 100 ไมโครเมตร) ขั้นตอนการเก็บสารระเหยจะใส่ไฟเบอร์ไปในส่วน Headspace ของภาชนะบรรจุ ส่งผลให้สารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ถูกสกัดออกจาก sample matrix

3.2 Gas chromatography / Mass spectrometer (GC/MS)

GC-MS เป็นเทคนิคที่เริ่มนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้ค่อนข้างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบ fingerprint ของเลขมวล (mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ได้อย่างถูกต้อง mass spectrometer เป็น detector ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยอาศัยกลไกคือโมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC นั้นจะถูกไอออไนซ์ในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ แล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (mass number) เทียบกับข้อมูลอ้างอิงแล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้น ๆ

หลักการทำงานของเครื่อง GC-MS นั้นเริ่มจากนำตัวอย่างฉีดเข้าเครื่อง GC จากนั้นสารก็จะถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ เมื่อผ่านเข้าสู่ column ที่อยู่ใน oven จากนั้นองค์ประกอบใดที่ถูกแยกออกมาจาก column ก่อนก็จะผ่านเข้าไปในส่วนของเครื่อง MS ซึ่งมีสภาวะเป็นสุญญากาศก่อนแล้วเข้าไปเจอกับ ion source ซึ่งจะทำหน้าที่ไอออไนซ์โมเลกุลที่ผ่านเข้ามาให้กลายเป็นประจุ จากนั้นประจุเหล่านี้ก็จะเดินทางผ่านเครื่องคัดเลือกและแยกแยะขนาดของประจุ (mass analyzer) เพื่อดูว่าประจุเหล่านั้นประกอบไปด้วยขนาดมวลเท่าใดบ้าง ก่อนที่จะเดินทางเข้าสู่เครื่องตรวจวัด (detector) เพื่อทำการตรวจหาปริมาณของประจุแล้วแปลผลออกมาเป็นปริมาณขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

Capillary gas chromatography มีความสำคัญมากต่อกระบวนการในการวิเคราะห์ทางเคมีของสารอินทรีย์ สำหรับการสรุปผลของสารเฉพาะในสารประกอบ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการแยกมวลเป็นวิธีการตรวจที่จะให้ข้อมูลที่สำคัญมาก ผลที่ได้มาจากการกำหนดของโมเลกุลสารหรือเศษที่แตกออกของสาร ดังนั้นจึงใช้ผลของ mass spectrometry ในการอ้างอิงการวิเคราะห์ผลทางอ้อม และใช้สำหรับยืนยันข้อเท็จจริง การทำงานร่วมกันอย่างสมบูรณ์ของ mass spectrometry และ gas chromatography ของ GC/MS ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มมากขึ้น

ระยะเริ่มแรกของปี 1980 mass spectrometry มีราคาแพงมาก มีความยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลาและการดูแลมาก และแทบจะไม่มีการทดลองที่ต้องใช้ GC เพราะไม่มีอุปกรณ์ ในปี 1990 mass spectrometry เป็นที่ยอมรับมากขึ้น เพราะการเตรียมวิธีการต่างๆ ง่ายขึ้นและเพราะมีความทันสมัยของระบบคอมพิวเตอร์ ผลของ GC/MS เป็นที่ใช้กันอย่างกว้างขวางควบคู่ไปกับวิธีการ spectroscopic แบบดั้งเดิม เทคนิคที่ใช้ detection มีความจำเพาะและความไวสูงมาก

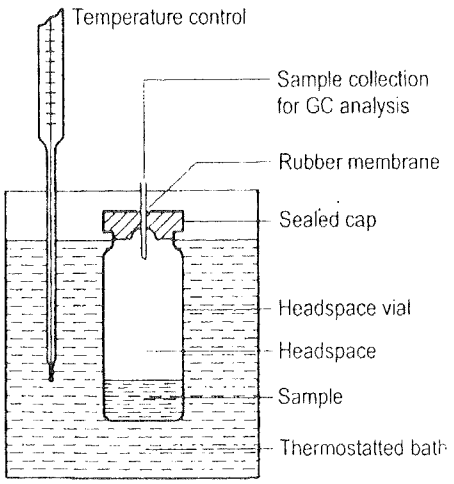
การควบคุมกระบวนการ chromatographic ให้นิ่งช่วยทำให้เกิดความจำเพาะเจาะจงและส่งเสริมระบบการวิเคราะห์ของ GC/MS และความสามารถในการวิเคราะห์ของระบบ GC/MS อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับสิ่งที่มีอิทธิพลควบคุม spectrometry การประเมินข้อมูลและขอบเขตในการตรวจพบสารจะมีความสามารถลดลงเมื่อมีจำนวนสารประกอบมากขึ้น

การทำงานร่วมกันของ gas chromatography กับ mass spectrometry ใช้ silica capillaries เป็นฟิล์มมีบทบาทสำคัญในการให้ผลของการวิเคราะห์ทางเคมีขั้นสูง โดยเฉพาะในสาขาวิชาการวิเคราะห์สิ่งแวดล้อม ข้อจำกัดของ GC และ GC/MS คือให้ผลที่ไม่เป็นข้อเท็จจริงของตัวอย่างที่เป็นส่วนประกอบที่ไม่สามารถระเหยได้ ในลักษณะนี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเตรียมตัวอย่างให้เหมาะสมในการวิเคราะห์ ซึ่งในปัจจุบันมีหลายวิธีเช่น headspace (ภาพที่ 2.13) และ purge และ trap เทคนิค, thermodesorption, Solid-phase microextraction (SPME), supercritical fluid extraction (SFE) ในการช่วยให้ระบบการทำงานของ GC/MS ง่ายขึ้น

3.3 Solid-phase microextraction

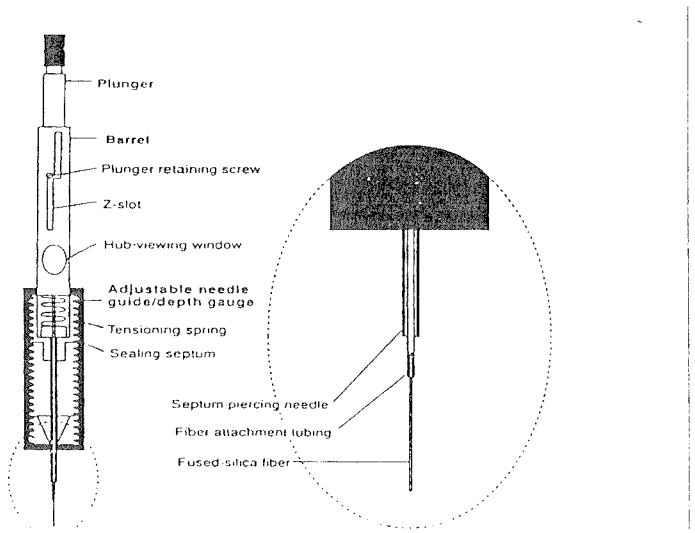
ทุกๆ การวิเคราะห์กลิ่นจะมีปัญหาเหมือนๆ กัน และอย่างไรก็ตามมีวิธีที่ดีที่ผ่านการคัดเลือกจากหลายๆ วิธีที่มีชื่อเสียงในการแยกสารซึ่งเป็นทางออกของปัญหาที่เหมาะสม การวิเคราะห์กลิ่นของนักเคมี เป็นการรวมกันของการแยกออกและการบ่งชี้เอกลักษณ์ของส่วนประกอบสารผสม สารผสมประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่มีความแปรปรวนของลักษณะขั้ว

โดยส่วนใหญ่กลิ่นทางเคมีจะระเหยได้ สิ่งที่เกิดขึ้นเกิดจากความไม่บริสุทธิ์ของตัวทำละลาย หรือโดยวิธี decomposition ของโครงสร้าง หรือกลิ่นสารเคมีของตัวมันเอง



ภาพที่ 2.12 ตัวอย่างวิธีการทำ headspace technique

ที่มา: Oliver, R. W. A. HPLC of Macromolecules A Practical Approach, 2nd ed.



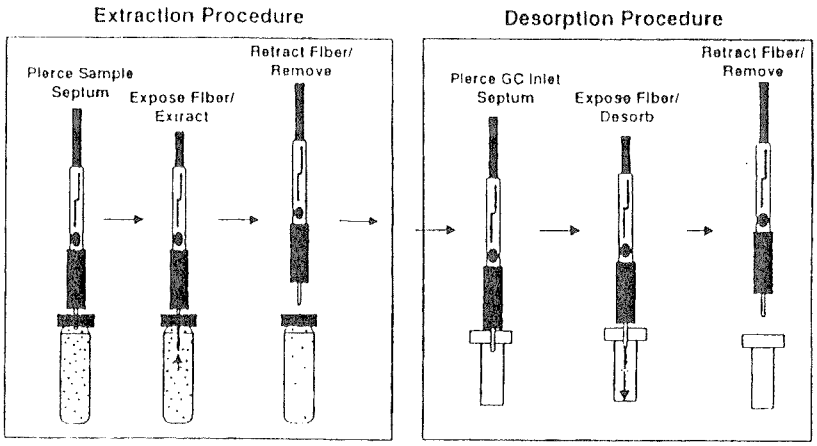
ภาพที่ 2.13 ส่วนประกอบต่างๆของ Solid-phase microextraction (SPME)

ที่มา: Oliver, R. W. A. HPLC of Macromolecules A Practical Approach, 2nd ed.

ไฟเบอร์ชั้นนอกหุ้มด้วย nonpolar polydimethylsiloxane และ more polar polyacrylate มีขายในปัจจุบัน และการพัฒนาไฟเบอร์อื่นอีกหลากหลายชนิดประกอบด้วย carbowax, cardoxen และ divinylbenzene copolymers สำหรับการวิเคราะห์ส่วนใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สารประกอบที่ละเหยได้ง่าย จะใช้ไฟเบอร์ 100 ไมโครเมตร หุ้มด้วย polydimethysiloxane

3.4 กลไกของวิธีการของSPME

กระบวนการของการทำ Solid-phase microextraction แสดงในภาพที่ 2.14 บรรจุตัวอย่างเข้าไปในขวดเล็ก หรือ ภาชนะอื่นที่เหมาะสม ที่ปิดผนึกด้วยฝาครอบ ไฟเบอร์จะต้องถูกทำความสะอาดก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ตัวอย่าง เพราะชั้นของโพลิเมอร์สามารถดูดกลิ่นที่มีอยู่ในอากาศและสร้าง background สูงใน chromatogram การทำความสะอาดสามารถทำได้ใน เวลา 2-3 นาที โดยใส่ไฟเบอร์เข้าไปใน auxiliary injection port หรือใช้ syringe cleaner



ภาพที่ 2.14 ขั้นตอนการสกัดและการดูดซับสารวิเคราะห์โดยใช้ SPME
ที่มา: Oliver, R. W. A. HPLC of Macromolecules A Practical Approach, 2nd ed.

สำหรับตัวอย่างที่เป็นของเหลวเข็ม SPME ทิ่มผ่านผนังกั้นและยื่นไฟเบอร์ออกมาจากปลายเข็มและเข้าไปในสารละลาย ระหว่างช่องว่างด้านบนของตัวอย่างไฟเบอร์ยื่นออกมาในส่วนที่เป็นไอเหนือตัวอย่างที่เป็นของเหลวหรือของแข็ง เทคนิคเตรียมตัวอย่างจะเติมเกลือโซเดียมคลอร์ลงไปในสารละลาย ซึ่งจะทำให้เข้าสู่จุดสมดุลมากขึ้นในชั้นสารอินทรีย์ของไฟเบอร์ SPME