

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารประกอบอินทรีย์

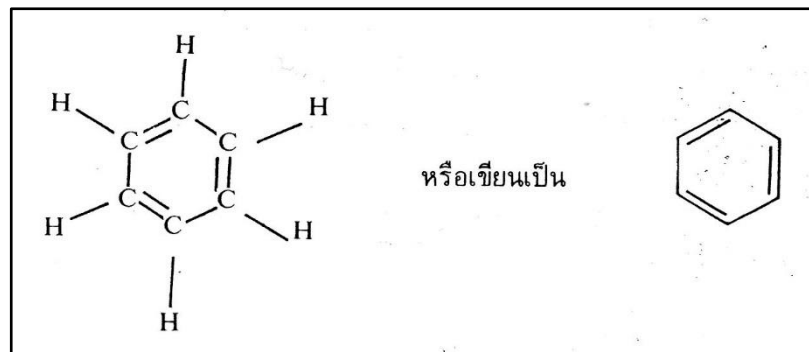
สารประกอบอินทรีย์ หมายถึง สารประกอบเคมีที่อยู่ในสถานะใดก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ที่มีธาตุคาร์บอน เป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วม เช่น ธาตุ O, N, P, S, Cl, และ Br เป็นต้น อาจมาจากสิ่งมีชีวิตและจากการสังเคราะห์ ยกเว้นสารประกอบบางชนิดที่ไม่จัดว่าเป็นสารประกอบอินทรีย์แม้ว่าจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบก็ตาม ตัวอย่างเช่น สารประกอบคาร์ไบน์, คาร์บอนेट, ออกไซด์ของคาร์บอนและไซยาไนด์ เช่นเดียวกับอัญรูปของคาร์บอน อย่างเช่น เพชรและแกรไฟต์ ซึ่งถูกจัดเป็นสารประกอบอนินทรีย์ (กฤษณา ชูติมา, 2541) โดยข้อแตกต่างของสารอินทรีย์และอนินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติและข้อแตกต่างระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์
(ที่มา: กฤษณา ชูติมา, 2541)

สมบัติ	สารอินทรีย์	สารอนินทรีย์
ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ส่วนใหญ่เป็นธาตุ C และ H ธาตุอื่น ๆ เช่น O, N, S, P, Cl, Br, และ I	ธาตุทุกชนิด
ชนิดของพันธะเคมี	พันธะโคเวเลนต์	มีทั้งพันธะโคเวเลนต์และพันธะไอออนิก(ส่วนมากเป็นไอออนิก)
การละลายน้ำ	ส่วนมากไม่ละลายน้ำ ยกเว้นพวกโมเลกุลมีขั้วขนาดเล็ก ๆ เช่น แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์	ส่วนมากละลายน้ำได้ดี
การนำไฟฟ้าของสารละลาย(ในน้ำ)	ไม่นำไฟฟ้าหรือนำได้น้อยมาก	ส่วนใหญ่พวกที่ละลายน้ำจะนำไฟฟ้าได้ดีโดยเฉพาะสารไอออนิก
การละลายในตัวทำละลายอินทรีย์	ส่วนมากละลายได้ดี	ส่วนมากไม่ละลาย
จุดหลอมเหลว จุดเดือด	ส่วนมากค่อนข้างต่ำ	ส่วนมากค่อนข้างสูง
การเผาไหม้	ติดไฟง่าย อาจมีเขม่า	ติดไฟยาก ต้องใช้ความร้อนสูงมากและเมื่อติดไฟแล้วจะมีกากของแข็งเหลืออยู่
อัตราการเกิดปฏิกิริยา	เกิดค่อนข้างช้า	เกิดเร็ว
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ส่วนมากต้องใช้	ส่วนมากไม่ต้องใช้

2.2 สารประกอบอะโรมาติก

อะโรมาติกเป็นไฮโดรคาร์บอน เป็นสารที่มีแต่คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยมีโครงสร้างเป็นวงในลักษณะที่แตกต่างจากสารอะลิฟาติก ถ้าเป็นวงเดี่ยวที่ไม่มีหมู่เกาะที่วง จะมีสูตรทั่วไปเป็น C_nH_n ตัวอย่างเช่น เบนซีน (C_6H_6) รูปที่ 2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของสารอะโรมาติกจะเป็นสารที่ไม่อิ่มตัวสูง เพราะมีพันธะคู่ในโมเลกุลหลายพันธะ จึงมีความเสถียรสูง โดยทั่วไปเบนซีนมักไม่เกิดปฏิกิริยาการเพิ่ม เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน เพราะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความไวสูง เช่น โรเดียมคาร์บอน หรือถ้าใช้ตัวเร่งปกติเช่นแพลตตินั่มจะต้องทำในบรรยากาศที่มีความดันและความร้อนสูง สารอะโรมาติกจึงเกิดปฏิกิริยาแทนที่ได้ง่ายกว่า เช่น การแทนที่ด้วยอิเล็กโตรไฟล์และนิวคลีโอไฟล์ (สุนันทา วิบูลย์จันทร์, 2548)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของเบนซีน

(ที่มา: สุนันทา วิบูลย์จันทร์, 2548)

2.3 สารอินทรีย์ระเหยง่าย

สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) เป็นสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ในอุณหภูมิห้องและความดันปกติทำให้เกิดอากาศที่มีความเป็นพิษ (Toxic Air) โมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นหลักซึ่งอาจมีอะตอมของออกซิเจนหรือคลอรีนร่วมด้วย สารอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารเคมีที่สำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ทุกคนต้องใช้ในครัวเรือนหลายประเภท เช่น ทินเนอร์ สารทำความสะอาด สารตัวทำละลาย น้ำมันหล่อลื่น คิวบ์หรือ สีสทาบ้าน น้ำยาฟอกสี น้ำยาซักแห้ง ยาฆ่าแมลง หรือแม้แต่สารที่เกิดจากการเผาไหม้ และสารอินทรีย์ระเหยง่ายยังสามารถแฝงตัวอยู่ในอากาศ อาหาร และแหล่งน้ำ เป็นต้น สารอินทรีย์ระเหยง่ายเหล่านี้สามารถเข้าสู่ร่างกายได้โดยการหายใจ การบริโภค การสัมผัส ในปัจจุบันกำลังเป็นปัญหาที่กำลังได้รับความสนใจจากองค์กรที่เกี่ยวข้องทางด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อมทั้งในประเทศและต่างประเทศ (พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555)

สารอินทรีย์ระเหยง่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

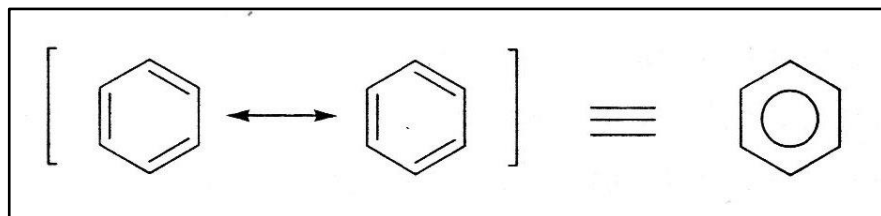
2.3.1 กลุ่ม Non Chlorinated VOCs หรือ Non Halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่ไม่มีอะตอมของฮาโลคลอรีนในโมเลกุล เช่น Hexane, Ethyl Alcohol, Methyl Alcohol, Formaldehyde, Toluene, Xylene, Benzene, Naphthalene, Styrene และ Phenol สารกลุ่มนี้เป็นอันตรายต่อสุขภาพอย่างยิ่งโดยเฉพาะกับระบบทางเดินหายใจ (พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555)

2.3.2 กลุ่ม Chlorinated VOCs หรือ Halogenated Hydrocarbons ได้แก่ กลุ่มไฮโดรคาร์บอนระเหยที่มีอะตอมของฮาโลคลอรีนในโมเลกุล เช่น 1,1,1,2-Tetrachloroethane, Carbon Tetrachloride, Chloroform, Dibromomethane, Dichloromethane, Ethylene Dibromide และ Vinyl Chloride โดยสารจำพวกนี้ จะออกฤทธิ์เป็นพิษมากกว่า ก่อให้เกิดโรคมะเร็งและเป็นตัวกระตุ้นการเกิดโรคมะเร็งอีกด้วย อีกทั้งยังมีความเสถียรมากกว่าสารในกลุ่ม Non Chlorinated VOCs (พงศ์เทพ วิวรรณะเดช, 2555)

2.4 เบนซีน

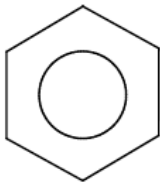
เบนซีนเป็นสารประกอบอะโรมาติกตัวแรกที่ถูกค้นพบ ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1825 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ Michael Faraday ที่ได้ทำการแยกสารประกอบบริสุทธิ์ชนิดหนึ่งจากแก๊สที่ใช้จุดให้ความสว่างที่ได้จากไขของปลาวาฬ พบว่าสารประกอบนี้มีจุดเดือด 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำไปวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบพบว่าประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและธาตุไฮโดรเจนในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งมีสูตรอย่างง่ายคือ CH เขาจึงตั้งชื่อสารประกอบนี้ว่า Carbureted hydrogen ต่อมาในปีค.ศ. 1834 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Eilhard Mitscherlich ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบชนิดเดียวกันนี้ จากการให้ความร้อนกรดเบนโซอิกกับปูนขาว และพบว่าสูตรอย่างง่ายคือ CH เช่นเดียวกันและยังสามารถหามวลโมเลกุลได้เท่ากับ 78 ดังนั้นสูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้คือ C_6H_6 ขณะเดียวกันก็ยังสามารถแยกสารประกอบนี้ได้จากกำยาน (Gum benzoin) ดังนั้น Mitscherlich จึงให้ชื่อสารประกอบนี้ว่า เบนซีน (Benzin)

ถึงแม้ว่านักเคมีจะรู้จักสารประกอบเบนซีนกันอย่างกว้างขวาง แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างโมเลกุลนี้ก็ยังคงเป็นความลับอยู่จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1866 นักเคมีชาวเยอรมันชื่อ Friedrich August Kekule' ได้เสนอโครงสร้างของเบนซีนว่ามีโครงสร้างเป็นวงที่ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่ Kekule' กล่าวว่าโครงสร้างนี้ได้จากความฝันครั้งหลังครั้งตื่นของเขา โคนเขาฝันว่าอะตอมจำนวนมากกำลังกระโดดโลดเต้นไปมาแล้วเริ่มจับกลุ่มเรียงตัวเป็นเส้นยาวเหมือนงู แต่มีงูตัวหนึ่งกำลังกินหางของตัวเองทำให้เห็นเป็นวงกลม เมื่อเขาตกใจตื่นเขาจึงสร้างความคิดรวบยอดเกี่ยวกับคาร์บอนหกอะตอมจับตัวกันในลักษณะวงแหวนของเบนซีน โดยมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวดังรูปที่ 2.2 (ทวีสิน นาวารัตน์, 2553)



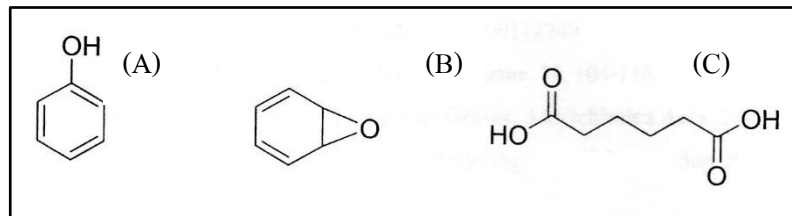
รูปที่ 2.2 โครงสร้างเบนซีนของ Kekule'
(ที่มา: ทวีสิน นาวารัตน์, 2553)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆของเบนซีน
(ที่มา: EPA,1998)

IUPAC name	Benzene
ชื่ออื่น	Phenyl hydride, Benzohexatriene, Benzol, Pyrobenzole, Coal naphtha, Cyclohexatriene
CAS Number	71-43-2
UN Number	1114
สูตร โมเลกุล	C ₆ H ₆
โครงสร้าง	
มวล โมเลกุล	78.12 g (0.17 lbs)
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลว ไม่มีสีมีกลิ่นหอม ระเหยเป็นไอได้ง่าย
ความหนาแน่น	0.8749 g/cm ³ (0.0141 lb/ft ³) ที่ 20°C
จุดหลอมเหลว	5.5°C (41.9°F)
จุดเดือด	80.1°C(176.18°F)
ความสามารถในการละลายน้ำ	0.180 g/100 mL (1800 ppm) ที่ 25°C ละลายในตัวทำละลาย ได้แก่ แอลกอฮอล์, อีเทอร์, อะซิโตน, คาร์บอนเตตระคลอไรด์, คาร์บอนไดซัลไฟด์ และ กรดอะซิติก
ความหนืด	0.652 cP ที่ 20°C
แรงตึงผิว	0.033 g/cm ³ (28.18 dynes/cm ³)
ความดันไอ	95.2 mmHg (12.7 kPa) ที่ 25°C
อุณหภูมิที่ระเบิดได้เอง	562°C (1044°F)
จุดวาบไฟ	-11.1°C (12°F)
Conversion factors	$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ ppm} = 3.19 \text{ mg/m}^3 \\ 1 \text{ mg/L} = 313 \text{ ppm} \text{ ที่ } 25^\circ\text{C} \text{ (77}^\circ\text{F)} \\ 1 \text{ mg/m}^3 = 0.31 \text{ ppm} \end{array} \right\}$

2.5 สารก่อมะเร็งจากเบนซีน

รายงานที่แสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องระหว่างเบนซีนกับการเกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาวได้ถูกตีพิมพ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1928 โดย Delore และ Borgomano ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาก็ได้มีการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวาง จนนำไปสู่ข้อสรุปที่ว่าเบนซีนเป็นสารก่อมะเร็งโดยเป็นพิษต่อสารพันธุกรรมทำให้เกิดมะเร็งเม็ดเลือดขาว รายงานจากคณะกรรมการวิชาการ ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์นครราชสีมา และศูนย์ข้อมูลพิษวิทยาระบุว่า เมื่อเบนซีนเข้าสู่ร่างกายจะกระจายตัวในเลือดอย่างรวดเร็วและถูกเมตาโบไลต์ (Metabolized) ที่ตับไปเป็นสารตัวกลาง (Metabolites) เช่น ฟีนอล เบนซีนออกไซด์ และกรดมิวโคนิก เป็นต้น ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสารตัวกลางบางตัวจะกลายสภาพไปเป็นสารก่อมะเร็งที่มีความไวต่อความผิดปกติทางพันธุกรรม (Mutation) ผลทางพิษวิทยาเมื่อได้รับสารเบนซีนเข้าสู่ร่างกายทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง ได้แก่ ทำให้เกิดการระคายเคืองและพุพอง พิษต่อระบบประสาท ทำให้ปวดศีรษะ มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน ชักหมดสติ และเสียชีวิตได้ พิษต่อระบบเลือด ทำลายไขกระดูกทำให้จำนวนเม็ดเลือดขาวและเกล็ดเลือดต่ำ ก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางแบบ Aplastic anemia (ทวิสิน นาวารัตน์, 2553)



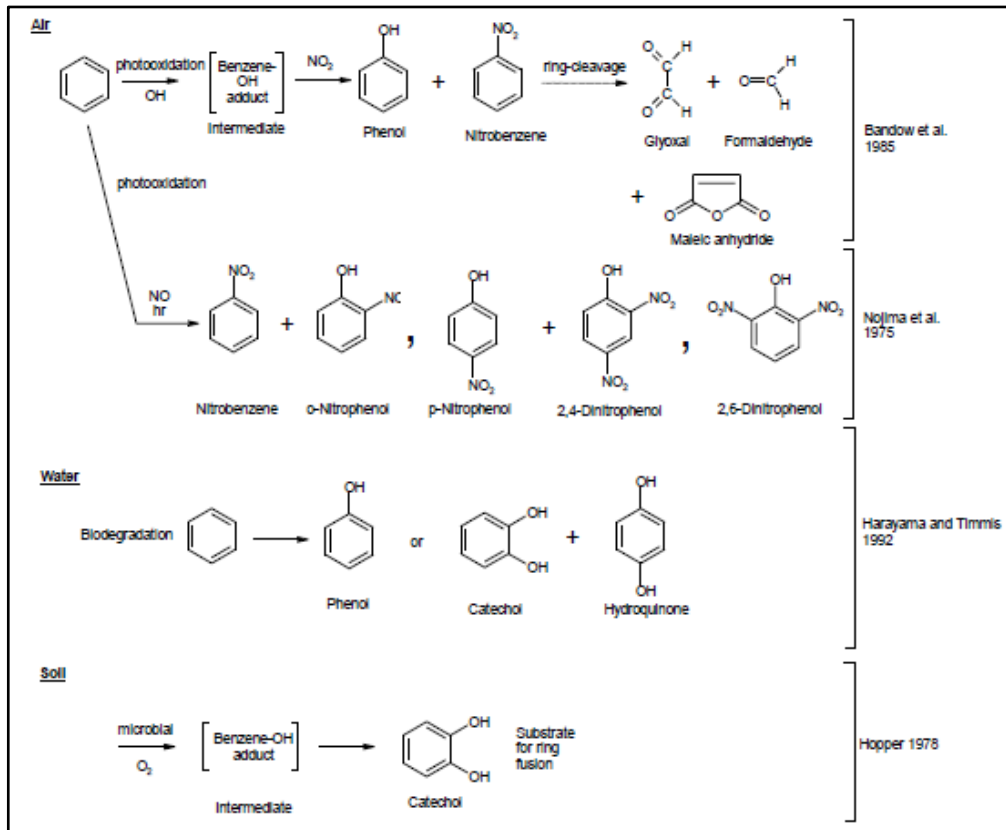
รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างสารตัวกลาง (Metabolites)

(A= ฟีนอล, B= เบนซีนออกไซด์, C= กรดมิวโคนิก)

(ที่มา: ทวิสิน นาวารัตน์, 2553)

2.6 การเปลี่ยนรูปของเบนซีนในสถานะต่างๆ

การเปลี่ยนรูปและการย่อยสลายเบนซีนมีความแตกต่างกันทั้งในน้ำ ดินและอากาศ ดังรูปที่ 2.4 โดยในบรรยากาศมักอยู่ในรูปของไอระเหย (Eisenreich et al., 1981) การย่อยสลายเบนซีนสามารถทำได้โดยการปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลแรดดิคัล ($\text{OH}\cdot$) โดยค่าคงที่การทำปฏิกิริยาของเบนซีนกับไฮดรอกซิลแรดดิคัลอยู่ที่ $1.3 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{molecule-second}$ ที่ระยะเวลา 8 วัน ที่ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลแรดดิคัลในบรรยากาศเท่ากับ $1.1 \times 10^6 \text{ molecule/cm}^3$ (Gaffney and Levine, 1979; Lyman, 1982) หากไฮดรอกซิลแรดดิคัลมีความเข้มข้น $1 \times 10^8 \text{ molecule/cm}^3$ ระยะเวลาจะสั้นเพียง 2.1 ชั่วโมง (Lyman, 1982) นอกจากนี้เบนซีนยังสามารถทำปฏิกิริยากับสารออกซิแดนท์อื่นๆ อย่างเช่น ไนเตรทแรดดิคัลและโอโซน อย่างไรก็ตามอัตราการย่อยสลายพิจารณาแล้วว่าไม่มีความสำคัญเมื่อเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาของไฮดรอกซิลแรดดิคัล โดยค่าคงที่การทำปฏิกิริยาของโอโซนเท่ากับ $7 \times 10^{-23} \text{ cm}^3/\text{molecule-second}$ จะใช้เวลาในการย่อยสลายเบนซีนสูงถึง 472 ปี (นอกเมือง) และ 152 ปี (ในเมือง) (Pate et al., 1976) โดยความเข้มข้นของโอโซนนอกเมืองเท่ากับ $9.6 \times 10^{11} \text{ molecule/cm}^3$ และความเข้มข้นของโอโซนในเมืองเท่ากับ $3 \times 10^{12} \text{ molecule/cm}^3$ (Lyman, 1982)

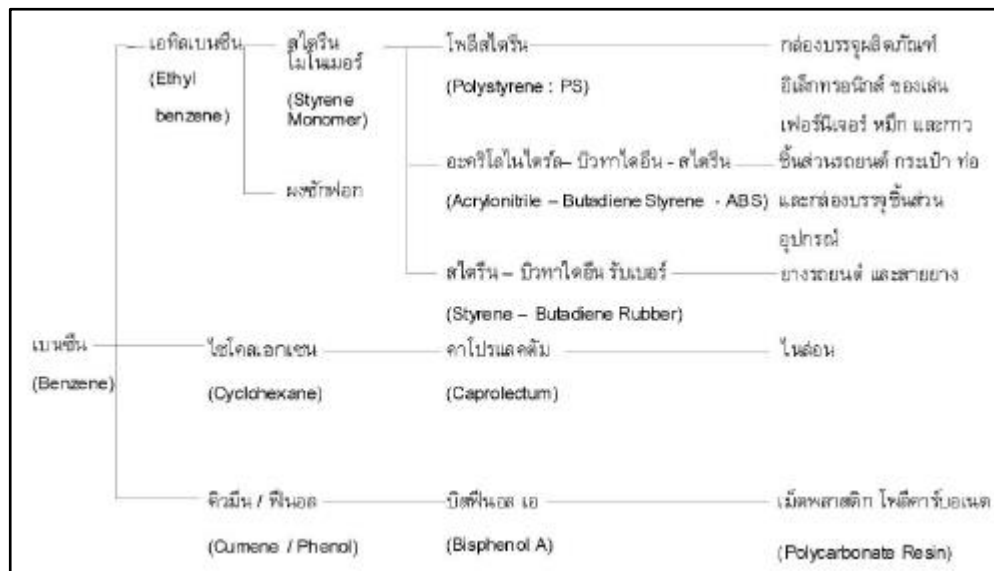


รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนรูปของเบนซีนที่อยู่ในสถานะต่างๆ

(ที่มา: ATSDR, 2007)

2.7 การใช้ประโยชน์จากเบนซีนและสถานการณ์ปริมาณเบนซีนในอากาศ

เบนซีนเป็นตัวทำละลายในกลุ่มของอะโรมาติกชนิดหนึ่ง เป็นสารที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมันดิน ในอดีตนิยมใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น สี หมึก ทินเนอร์ ยาฆ่าแมลง น้ำยาลบสี เป็นตัวทำละลายและเป็นส่วนผสมในน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline) และยังเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ในการผลิตสารเคมีอื่นหลายชนิด เช่น styrene phenol cyclohexane สารเคมีที่ใช้ในการผลิตสารซักฟอกยาฆ่าแมลงยาน้ำหอมวัตถุระเบิด และน้ำยาลบสี อุตสาหกรรมที่มีการนำเบนซีนไปใช้ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ อุตสาหกรรมผลิตเม็ดพลาสติก อุตสาหกรรมผลิตผงซักฟอกและผลิตภัณฑ์ซักล้าง อุตสาหกรรมผลิตตัวทำละลาย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552) รูปที่ 2.5 แต่เนื่องจากมีคุณสมบัติก่อมะเร็ง ทำให้ปัจจุบันมีการใช้เบนซีนเป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์ต่างๆ น้อยลง ผู้ผลิตส่วนใหญ่จะเปลี่ยนมาใช้ตัวทำละลายตัวอื่นที่ปลอดภัยกว่า เช่น toluene หรือ xylene แทน อย่างไรก็ตามในผลิตภัณฑ์บางประเภทก็ยังคงมีการใช้เป็นส่วนผสมอยู่ โดยต้องดูจากผลรวมของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือนหากผลิตจากผู้ผลิตที่มีคุณภาพจะไม่มีการใช้สารเบนซีน ในหลายประเทศมีการออกกฎหมายห้ามใช้เบนซีนผสมในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน (วิวัฒน์ เอกบูรณะวัฒน์, 2555)



รูปที่ 2.5 การนำเบนซีนมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ (ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

2.8 ค่ามาตรฐานในสิ่งแวดล้อม

ในปัจจุบันมีการกำหนดค่ามาตรฐานของสารอินทรีย์ระเหยง่ายในสิ่งแวดล้อมในหลายๆหน่วยงาน เพื่อเป็นการควบคุมการปลดปล่อยที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของมนุษย์ โดยมีค่ามาตรฐานต่างๆดังนี้

ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานที่อนุญาตให้มีสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆในอากาศ
(ที่มา: ชนสร ต้นศฤงฆาร, 2548)

สาร	หน่วยงาน	ปริมาณความเข้มข้น
เบนซีน	OSHA	1.0 ppm > 8 hours (TWA)
	NIOSH	5.0 ppm < 5 minute (STEL)
		0.1 ppm > 10 hours (TWA)
	ACGIH	1.0 ppm 15 minute (STEL)
โทลูอีน	OSHA	0.5 ppm > 8 hours (TWA)
	NIOSH	2.5 ppm (STEL)
		100 ppm (STEL)
	ACGIH	500 ppm (STEL)
เอทิลเบนซีน	OSHA	100 ppm (TWA)
	NIOSH	500 ppm (TWA)
		100 ppm (TWA)
	ACGIH	50 ppm (TWA)
ไซลีน	OSHA	100 ppm > 10 hours (TWA)
	ACGIH	125 ppm (STEL)
		100 ppm > 8 hours (TWA)
	NIOSH	125 ppm (STEL)
MTBE	OSHA	0.1 mg/m ³ (TWA)
	ACGIH	0.1 mg/m ³ (TWA)
MTBE	OSHA	100 ppm (TWA)
	ACGIH	50 ppm (TWA)

หมายเหตุ TWA = Time – Weighted – Average, STEL = Short – Term Exposure Limit
OSHA = Occupational Safety and Health Administration
NIOSH = National Institute for Occupational Safety and Health
ACGIH = American Conference of Industrial Hygienists

ตารางที่ 2.4 ค่ามาตรฐานสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 1 ปี
(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

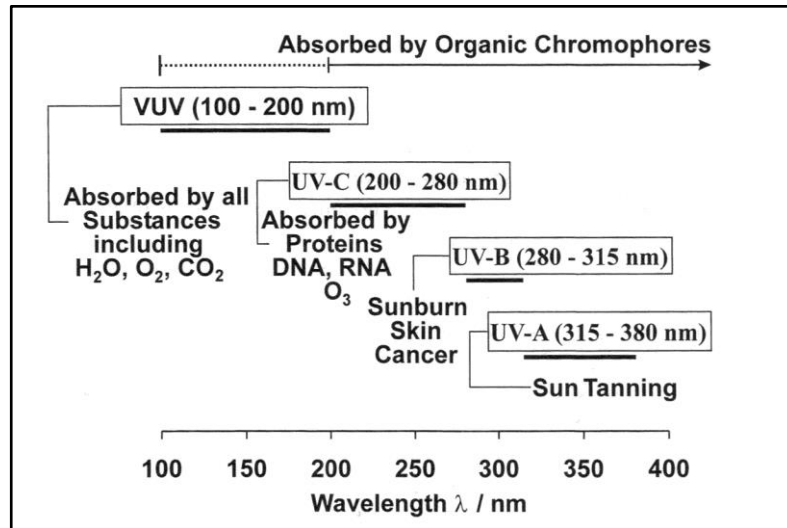
สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน
1. เบนซีน (Benzene)	ไม่เกิน $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.000495 ppm)
2. ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	ไม่เกิน $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
3. 1,2-ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	ไม่เกิน $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
4. ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	ไม่เกิน $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$
5. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	ไม่เกิน $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$
6. 1,2-ไดคลอโรโพรเพน (1,2-Dichloropropane)	ไม่เกิน $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$
7. เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	ไม่เกิน $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$
8. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ไม่เกิน $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$
9. 1,3-บิวทาไดอีน (1,3-Butadiene)	ไม่เกิน $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ตารางที่ 2.5 ค่ามาตรฐานการเฝ้าระวังสำหรับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศโดยทั่วไปในเวลา 2 ชั่วโมง
(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2550)

สารมลพิษ	ค่ามาตรฐาน
1. อะซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde)	ไม่เกิน $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2. อะคริโลไนไตร (Acrylonitrile)	ไม่เกิน $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
3. เบนซีน (Benzene)	ไม่เกิน $7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.00221 ppm)
4. เบนซิลคลอไรด์ (Benzyl Chloride)	ไม่เกิน $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$
5. 1,3 – บิวทาไดอีน (1,3-Butadiene)	ไม่เกิน $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$
6. โบรโมมีเทน (Bromomethane)	ไม่เกิน $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$
7. คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)	ไม่เกิน $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$
8. คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	ไม่เกิน $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$
9. 1,2 – ไดโบรโมอีเทน (1,2-Dibromoethane)	ไม่เกิน $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$
10. 1,4-ไดคลอโรเบนซีน (1,4-Dichlorobenzene)	ไม่เกิน $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
11. 1,2 – ไดคลอโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	ไม่เกิน $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$
12. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane)	ไม่เกิน $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$
13. 1,2 – ไดคลอโรโพรเพน (1,2-Dichloropropane)	ไม่เกิน $82 \mu\text{g}/\text{m}^3$
14. 1,4-ไดออกเซน (1,4-Dioxane)	ไม่เกิน $860 \mu\text{g}/\text{m}^3$
15. อะครอลีน (2-Propenal/acrolein)	ไม่เกิน $0.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$
16. เตตระคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	ไม่เกิน $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$
17. 1,1,2,2-เตตระคลอโรเอทิลีน (1,1,2,2-Tetrachloroethane)	ไม่เกิน $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$
18. ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	ไม่เกิน $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$
19. ไวนิลคลอไรด์ (Vinyl Chloride)	ไม่เกิน $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$

2.9 กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต (VUV)

กระบวนการแวกคัมอัลตราไวโอเลต เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (AOPs) โดยใช้แสงที่มีความคลื่นในช่วง 100-200 นาโนเมตร รูปที่ 2.6 โดยกระบวนการนี้จะสามารถทำให้เกิดอนุมูลของไฮดรอกซิล (Hydroxyl Radical) ที่มีหน้าที่ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และไฮดรอกซิลแรดดิคัล (OH•) นี้ยังมีศักยภาพการออกซิไดซ์ที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารออกซิไดซ์ตัวอื่น ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าความยาวคลื่นและการดูดซับของแสงแต่ละประเภท
(ที่มา: Oppenlander, 2003)

ตารางที่ 2.6 ค่าพลังในการออกซิไดซ์ของสารต่างๆ

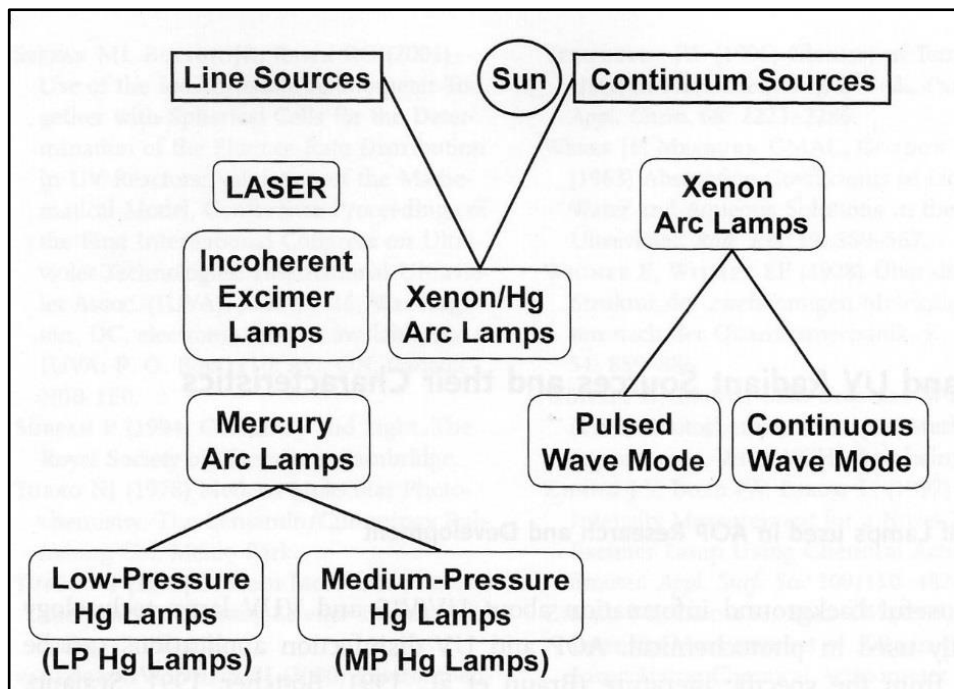
(ที่มา: Metcalf and Eddy, 2003)

Oxidizing agent	Oxidation Potential
Fluoride	3.06
Hydroxyl radical	2.80
Oxygen (atomic)	2.42
Ozone	2.08
Hydrogen peroxide	1.78
Hypochlorite	1.49
Chlorine	1.36
Chlorine dioxide	1.27
Oxygen molecular	1.23

2.10 หลอดไฟฟ้าที่ให้กำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต (VUV)

หลอดไฟฟ้าที่สามารถให้กำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลตได้มีอยู่ 2 ประเภท

1. หลอดเอ็กไซเมอร์ (Excimer lamp) หลอดประเภทนี้สามารถสร้างความยาวคลื่นได้หลายช่วง โดยแหล่งกำเนิดที่ได้ี้้นมาจาก rare gases และ halogen เช่นแก๊สนีออน (Ne) แก๊สอาร์กอน (Ar) แก๊สคริปทอน (Kr) และแก๊สซีนอน (Xe) เป็นต้น ในงานสิ่งแวดล้อมส่วนใหญ่จะใช้หลอดที่บรรจุแก๊สซีนอนซึ่งจะปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่น 172 นาโนเมตรซึ่งที่ความยาวคลื่นนี้ผลิตอนุมูลไฮดรอกไซด์ได้ดี แต่ข้อเสียคือหลอดประเภทนี้มีราคาแพง
2. หลอดปรอทความดันต่ำ (Low pressure mercury lamp, LP Hg lamps) หลอดประเภทนี้สามารถผลิตแสงที่มีความยาวคลื่น 185 และ 254 นาโนเมตร หลอดปรอทความดันต่ำมีความแตกต่างกับหลอดไฟที่ให้กำเนิดแสง UV ทั่วไปโดยเป็นหลอดที่ถูกห่อหุ้มด้วยแก้วควอทซ์ (quartz) ที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงสามารถให้กำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่น 185 นาโนเมตรที่เป็นตัวทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกไซด์



รูปที่ 2.7 แหล่งกำเนิดแสงแวลค์มอัลตราไวโอเลต

(ที่มา: Oppenlander, 2003)

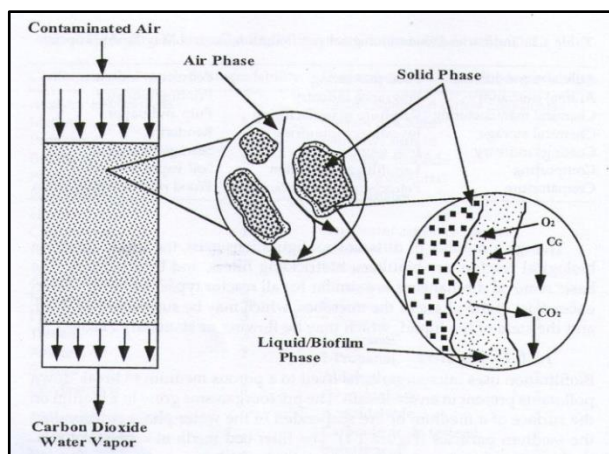
ตารางที่ 2.7 ความยาวคลื่นของหลอดเอกไซเมอร์

(ที่มา: Oppenlander, 2003)

	Rare gas	-	Ne	Ar	Kr	Xe
Halogen	-	-	-	126 nm	146 nm	172 nm
	F	158 nm	108 nm	193 nm	249 nm	354 nm
	Cl	259 nm	-	175 nm	222 nm	308 nm
	Br	289 nm	-	165 nm	207 nm	283 nm
	I	342 nm	-	-	190 nm	253 nm

2.11 กระบวนการกรองชีวภาพ (Biofiltration)

การกรองชีวภาพจะเป็นการกรองที่ประกอบไปด้วยตัวกลางพรุน โดยผิวของตัวกลางจะถูกปกคลุมไปด้วยน้ำและจุลินทรีย์ การทำงานของระบบจะเริ่มขึ้นจากการแลกเปลี่ยนสารมลพิษจากอากาศเข้าสู่ น้ำ (ไบโอฟิล์ม) การละลายสารมลพิษจะเป็นการเคลื่อนที่โดยการแพร่และการเคลื่อนที่ของอากาศ สารมลพิษจะกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วยสารประกอบอินทรีย์ในน้ำ จะถูกดูดซับโดยเอกไซโพลีแซกคาไรด์บนไบโอฟิล์มที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมาหรือจากตัวเซลล์จุลินทรีย์เอง และยังสามารถถูกดูดซับโดยตัวกลางที่ใช้ทำที่สุดการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพจะเปลี่ยนสารมลพิษให้กลายเป็นสารชีวมวล (Biomass), metabolic by-product หรือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังรูปที่ 2.8 ถ้าสารมลพิษประกอบด้วยคลอรีนหรือซัลเฟอร์เราจะเห็นอยู่ในรูปของคลอไรด์และซัลเฟต การย่อยสลายทางชีวภาพจะเกิดขึ้นโดยระบบนิเวศที่ซับซ้อนของสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่เป็นผู้ย่อยสลาย ผู้แข่งขัน และผู้ล่า (Joseph, 1999)

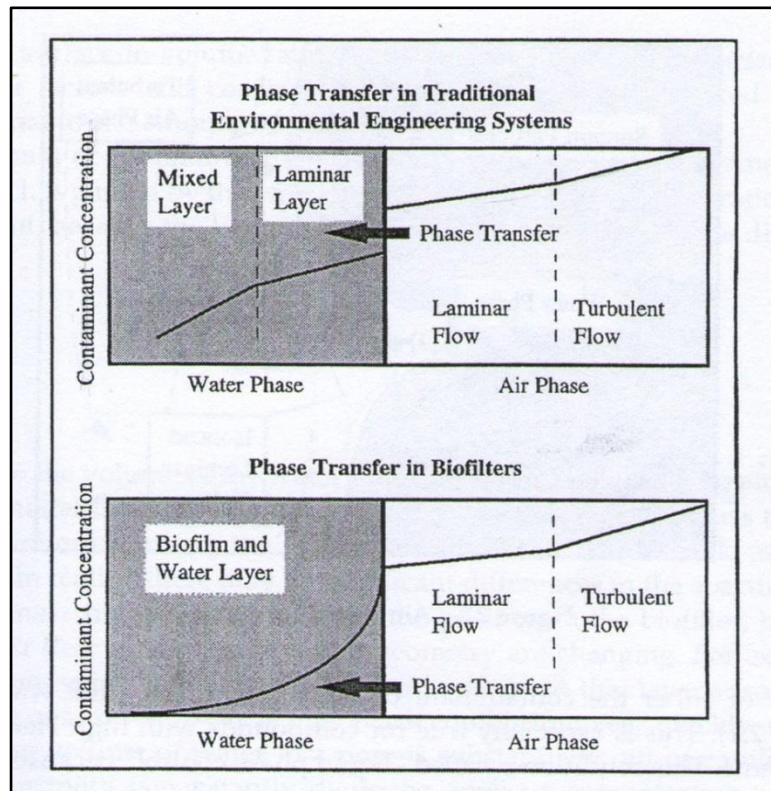


รูปที่ 2.8 กลไกการทำงานของกระบวนการกรองชีวภาพ

(ที่มา: Joseph et al., 1999)

2.11.1 กลไกของกระบวนการกรองชีวภาพ (Mechanism of biofiltration)

การถ่ายเทมวลของสารมลพิษจากอากาศไปสู่ น้ำจะมีด้วยกัน 4 ขั้นตอน เมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำต่ำจะเกิดการถ่ายเทมวลการจากอากาศที่มีความเข้มข้นสูงไปยังน้ำที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ดังรูปที่ 2.9 เมื่อการไหลของอากาศเป็นแบบปั่นป่วนจะทำให้สารมลพิษเคลื่อนที่โดยกระบวนการ Advection และ eddy diffusion เมื่อรวมกันเรามักจะเรียกว่า convection โดยบริเวณผิวน้ำและอากาศการไหลของอากาศจะเปลี่ยนเป็นแบบราบเรียบ จึงทำให้เกิดการแพร่ของโมเลกุลซึ่งเป็นที่มาของกลไกการเคลื่อนที่ เพราะการแพร่ของโมเลกุลจะช้ากว่า convection จึงสามารถเป็นตัวบ่งบอกอัตราของการถ่ายเทมวลในระบบ Activated sludge ได้ โดยเฉพาะในกรณีการถ่ายเทมวลของสารที่มีสภาพการละลายสูง แต่อากาศในระบบกรองชีวภาพไหลอย่างรวดเร็ว การไหลแบบปั่นป่วนจึงน้อยมาก เพราะระบบอื่นๆจะถ่ายเทมวลได้ช้าในขั้นนี้ อย่างไรก็ตามลักษณะของผิวน้ำในระบบจะไม่ราบเรียบ จึงเกิดการขัดขวางการถ่ายเทมวลในอากาศ และความแรงของผลกระทบนี้ไม่สามารถวัดค่าได้

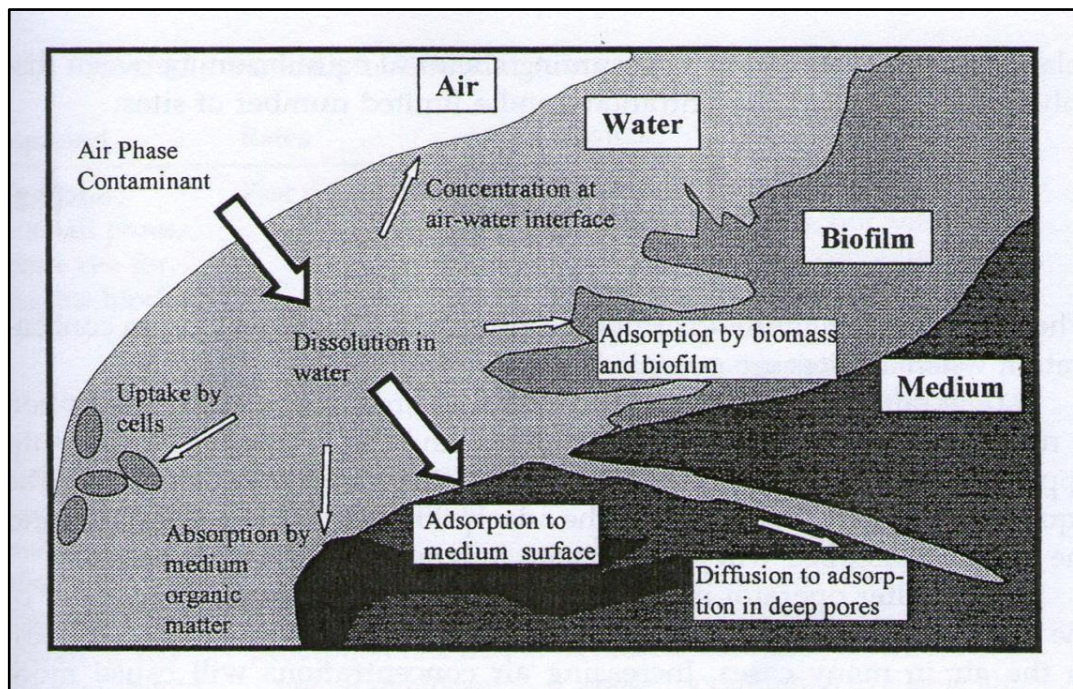


รูปที่ 2.9 กลไกการถ่ายเทมวลระหว่างเฟส

(ที่มา: Joseph et al., 1999)

2.11.2 การดูดซับสารมลพิษ (Adsorbed contaminants)

การถ่ายเทมวลของสารมลพิษจากอากาศสู่น้ำและของแข็งในการกรองชีวภาพเป็นขั้นตอนพื้นฐานในการบำบัด โมเลกุลของสารมลพิษอาจจะละลายได้ง่ายในน้ำแต่ก็อาจจะถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางดูดซึมเข้าไปในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ถูกดูดซับโดยไบโอฟิล์ม ถูกดูดซับโดยอินทรีย์สารในไบโอฟิล์มหรือตัวกลาง หรือถูกรวมอยู่ในน้ำ ดังรูปที่ 2.10 สำหรับมลพิษที่มีความสามารถในการละลายสูง เช่น เอทานอล การละลายจะเป็นลักษณะเด่น และปริมาณของน้ำจะสามารถพิจารณาจากอิทธิพลของจำนวนการถ่ายเทมวลไปสู่อากาศ (Devinny et al., 1997) ส่วนสารมลพิษไม่ชอบน้ำจะถูกดูดซับบนผิวของตัวกลางและถูกดูดซับภายในสารอินทรีย์เป็นหลัก



รูปที่ 2.10 กระบวนการดูดซับสารมลพิษ

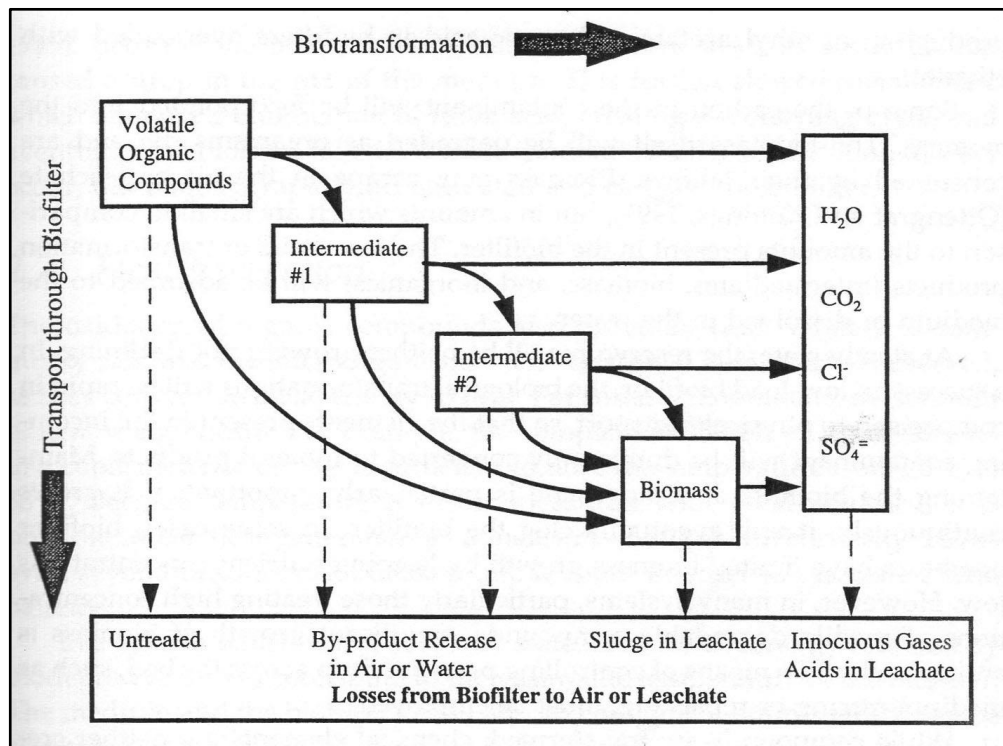
(ที่มา: Devinny et al., 1997)

2.11.3 การย่อยสลายสารมลพิษ (Contaminant biodegradation)

ปัจจัยในการทำลายสารมลพิษนั้นคือไบโอฟิล์ม ซึ่งเกิดจากสิ่งมีชีวิตที่เจริญเติบโตบนผิวของตัวกลาง และจากกิจกรรมภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปของสารมลพิษไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีความเป็นพิษ โดยจุลินทรีย์จะได้รับประโยชน์เป็นพลังงานทางเคมีจากองค์ประกอบของสารมลพิษ เช่น คาร์บอนจะใช้ในการเจริญเติบโตของเซลล์อีกด้วย

2.11.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Product generation)

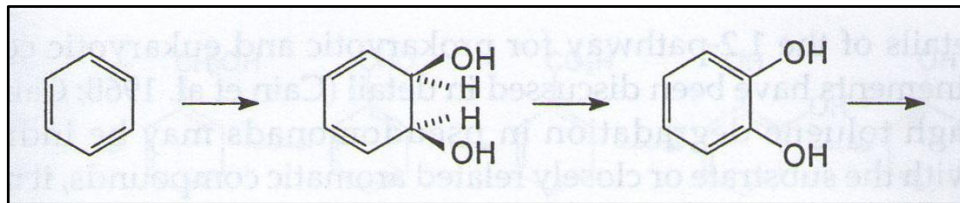
สารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือสารอนินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบกรองเช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือ แอมโมเนีย จะถูกเปลี่ยนเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ หรือ ซัลเฟตและไนเตรด สารประกอบบางชนิดสามารถเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์อันดับ 2 (Intermediate) ได้ โดยความซับซ้อนในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดอาจแตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.11



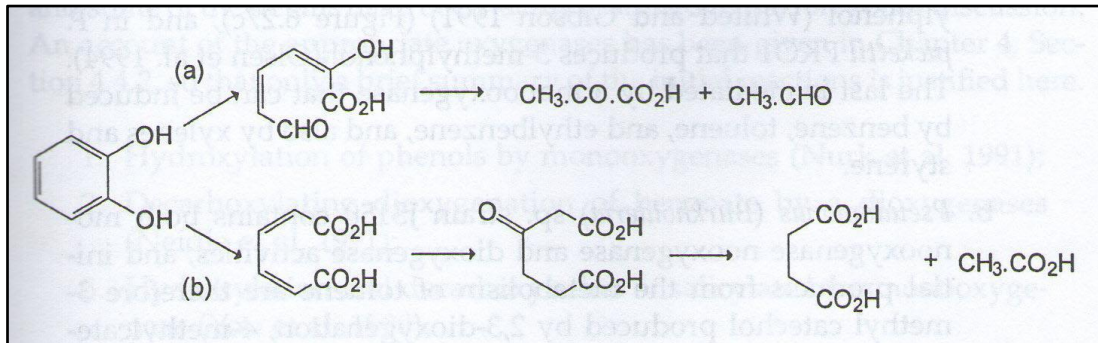
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ระเหยง่าย
(ที่มา: Joseph et al., 1999)

2.11.5 การย่อยสลายเบนซีนของกระบวนการกรองชีวภาพ

ในการย่อยสลายเบนซีนซึ่งเป็นสารอะโรมาติก จะย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการ Catabolic pathway เอนไซม์ที่จุลินทรีย์ปล่อยออกมาจะทำการออกซิไดซ์เบนซีนให้เป็นสาร intermediate นั้นก็คือ catechol โดยกลุ่มจุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้ได้แก่ *Mycobacterium rhodochrous*, *Pseudomonas aeruginosa* และ *Pseudomonas putida*



รูปที่ 2.12 การย่อยสลายเบนซีนทางชีวภาพโดย *PseudomonasPutida*
(ที่มา: Alasdair H. Neilson, 1999)



รูปที่ 2.13 กระบวนการ Metabolism catechol โดย catechol2,3-dioxygenase ใน *Pseudomonas Putida* และ โดย catechol1,2-dioxygenase ใน *Moraxella sp.*
(ที่มา: Alasdair H. Neilson, 1999)

เมื่อเบนซีนถูกออกซิไดซ์เป็น Catechol จากนั้นเอนไซม์ dioxygenase จะทำการแตกวงของ Catechol แล้วจะได้ *cis*,-*cis* - Muconate จากนั้นเอนไซม์ muconate – lactonizing ก็จะทำการเปลี่ยน *cis* ,-*cis* – Muconate ให้กลายเป็น Muconolactone ต่อจากนั้นเอนไซม์ muconolactoneisomerase ก็จะเปลี่ยน Muconolactone ให้กลายเป็น 3- oxoadipate enol – lactone ขั้นตอนที่ต่อไปเอนไซม์ oxoadipate enol – lactone hydrolase ก็จะเปลี่ยน 3- oxoadipate enol – lactone ให้กลายเป็น 3- oxoadipate สุดท้ายจะมีเอนไซม์ oxoadipate succinyl – CoA transferase ทำการเปลี่ยน 3- oxoadipate ให้ได้ Succinate และ Acetyl – CoA ออกมาเป็น product

2.11.6 วัสดุกรอง

การกรองชีวภาพจะทำงานโดยใช้ตัวกลางที่มีรูพรุนเพื่อสนับสนุนการทำงานของจุลินทรีย์และให้มลพิษในอากาศไหลผ่าน โดยตัวกลางที่ใช้มีทั้งที่ทำจากสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์และวัสดุสังเคราะห์ โดยแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันที่ขนาด ซึ่งมีผลต่อความต้านทานการไหลของอากาศและพื้นที่ผิวของไบโอฟิล์ม บางชนิดมีลักษณะเรียบ บางชนิดก็มีความขรุขระ ซึ่งความพรุนภายในตัวกลางจะเป็นตัวสร้างพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับสารมลพิษและในตัวกลางบางชนิดยังมีธาตุอาหารสำหรับจุลินทรีย์อีกด้วย ลักษณะของตัวกลางและการบรรจุจะเป็นพื้นฐานสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์และการเกิดแรงดันที่ต่ำลงในกระบวนการกรองชีวภาพ

2.11.7 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

- ความชื้น (Water content)

การทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพ ต้องมีการรักษาความชื้นในตัวกลางให้ได้เท่ากับ 40-80% โดยน้ำหนัก เพื่อรักษาสภาพให้จุลินทรีย์อาศัยและเจริญเติบโตได้

- ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดีที่สุด ค่าความเป็นกรด-ด่างควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6-8

- อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่เหมาะสมของกระบวนการกรองชีวภาพจะอยู่ในช่วง 20-30°C

- ภาระสารอินทรีย์ (Loading)

อัตราภาระสารอินทรีย์ หมายถึง ปริมาตรของก๊าซเสียต่อปริมาตรวัสดุตัวกรองต่อเวลา ดังสมการ

$$\text{Volumetric Loading} = Q \times V_f$$

โดย V_f = ปริมาตรของตัวกรองในระบบ (filter bed)

Q = อัตราการไหลของก๊าซ (Air flow rate)

$$\text{Mass loading} = (Q \times C_i) / V_f$$

C_i = ความเข้มข้นของสารมลพิษในก๊าซเสียที่เข้าสู่ระบบ (g/m^3)

2.12 การตรวจวัดเบนซีนในอากาศ

2.12.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

การตรวจวัดเบนซีนในอากาศจะใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ตู้อบ (Oven) สำหรับให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิ, ตัวฉีดสาร (injector), คอลัมน์ (Column), เครื่องตรวจวัด (Detector) และเครื่องจดบันทึก (recorder) โดยเครื่องตรวจวัดจะตรวจวัดปริมาณสารที่ผ่านออกมาจากคอลัมน์และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าป้อนเข้าสู่เครื่องจดบันทึก (คณิต กฤษณังกูร,2548)



รูปที่ 2.14 แก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น GC-14BFIDยี่ห้อ Shimadzu

2.12.2 FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

FTIR เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของสารอินทรีย์ อนินทรีย์และพันธะเคมีในโมเลกุล และยังสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสมตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด หลักการทำงานจะใช้รังสีอินฟราเรดในช่วง Middle Infrared ซึ่งสามารถให้ข้อมูลของโครงสร้างโมเลกุล เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับรังสีอินฟราเรดจะทำให้เกิดการสั่นของโมเลกุลและการหมุนของพันธะ โมเลกุลจะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความเข้มเดียวกันกับความถี่ในการสั่นของโมเลกุลของสารนั้น ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ในการสั่นที่ต่างกัน ทำให้สามารถวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารนั้นๆได้ (นภาพร พานิช และคณะ, 2553)



รูปที่ 2.15 เครื่องวิเคราะห์แก๊ส FTIR

(ที่มา: Gasmeter, 2014)

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชลันดา คุ่มวงษ์ (2552) ได้ทำการศึกษาการกำจัดเบนซีนโดยกระบวนการกรองชีวภาพชนิด 3-Stage Trickle-Bed Air Biofilter (TBAB) โดยใช้ดินมวลเบา LECA (Light Weight Expanded Clay Aggregate) ซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600-1200 °C ซึ่งพื้นที่ผิว (Surface Area) 164.90 m²/g ปริมาตรของรูพรุน(Pore volume)0.2087 cc./g Poresize 50.63 Å โดยพบว่าเมื่อดินมวลเบาสามารถในการดูดซับสารเบนซีนระหว่าง 0.00378 – 0.00467 g_{benzene}/g_{LECA} โดยประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพได้จากการใช้จุลินทรีย์จากบริษัทไบโอวิสท์และจากระบบ Activated Sludge (AS) มีค่าเท่ากับ 81% (37.8 g/m³-h)และ89% (34.1 g/m³-h) ตามลำดับ และระยะเวลาการกักเก็บ (EBRT: Empty Bed Residence Time) เท่ากับ 34.37 วินาที

Wang et al. (2009) ได้ทำการศึกษาการกำจัดคลอโรเบนซีนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการฉายแสงยูวีและกระบวนการกรองชีวภาพ โดยผลการศึกษาพบว่า การกำจัดคลอโรเบนซีนด้วยกระบวนการร่วมระหว่างการฉายแสงยูวีและกระบวนการกรองชีวภาพมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า การกำจัดคลอโรเบนซีนด้วยกระบวนการกรองชีวภาพเพียงอย่างเดียว โดยในช่วงความเข้มข้นขาเข้าเท่ากับ 250-1500 mg/m³ เวลาพัก 41-122 วินาทีในกระบวนการกรองชีวภาพและ 24-81 วินาทีในกระบวนการฉายแสงยูวี โดยหลังจากการทำกำบับัดเบื้องต้นด้วยแสงยูวีทำให้ประสิทธิภาพการกำบับัดของกระบวนการกรองชีวภาพสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบมีค่าเท่ากับ 50 g/m³-h

Moussavi and Mohseni (2007) ได้ศึกษาการทำกำบับัดเบื้องต้นด้วยแสงยูวี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการกรองชีวภาพในการกำจัดสารผสมของสารอินทรีย์ระเหยง่ายอะโรมาติก (aromatic VOCs) ในที่นี้คือ โทลูอีนและโอไซลีน (o-xylene) โดยใช้แสงยูวีปริมาณ 6 และ 12 mJ/cm² อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 6.3 และ 9.4 L/min เวลาพักเท่ากับ 45 และ 30 วินาที โดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์อยู่ระหว่าง 70 และ 650 mg_{carbon}/m³ โดยประสิทธิภาพที่ได้มากกว่า 95% นอกจากนี้ โอโซนที่ได้จากฉายแสงยูวียังช่วยในการควบคุมการเจริญเติบโตในไบโอฟิล์ม และกระบวนการกรองชีวภาพเพียงอย่างเดียวมี Pressure drop เท่ากับ 14 mm H₂O/m of bed ในขณะที่กระบวนการร่วมระหว่างการฉายแสงยูวีและกระบวนการกรองชีวภาพนั้นมี pressure drop น้อยกว่า 3 mm H₂O/m of bed

จากงานวิจัยอื่นๆของกระบวนการบำบัดด้วยกระบวนการกรองชีวภาพพบว่ามีการใช้ตัวกลางหลากหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นการตัวกลางที่มาจากธรรมชาติ เช่น ดิน ปุ๋ย ชานอ้อย และบางงานวิจัยใช้ตัวกลางที่ได้จากการสังเคราะห์เช่น Polyurethane โดยแต่ละงานวิจัยจะได้ค่า Elimination capacity ที่แตกต่างกัน ซึ่งความสามารถในการรับภาระค่าสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ได้แก่ ขนาดของปฏิกรณ์ ระยะเวลาพัก ชนิดของตัวกลางที่ใช้ เป็นต้นดังตารางที่ 2.8

ส่วนกระบวนการบำบัดไอระเหยเบนซินด้วยแสงนั้น ยังไม่พบงานวิจัยที่มีการใช้แสงแควคัม อัลตราไวโอเลต มีแต่การใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสูงกว่าระบบ VUV อาทิเช่น UV และ ฟลูออเรสเซนต์ ทั้งนี้การใช้ด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นที่สูงกว่าก็ยังคงสามารถบำบัดไอระเหยเบนซินได้ และยังทราบถึง intermediate ที่เกี่ยวข้อง โดยประสิทธิภาพการบำบัดแต่ละงานวิจัย แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบการบำบัดเบนซินของงานวิจัยอื่นๆ

Medium	Elimination capacity (g/m ³ -h)	ระบบ	reference
Sucarcane	3.8	Biofilter	L.sene et al.(2002)
Activated carbon	20.1	Biofilter	Jong-O Kim (2003)
Powdered compost	24.8	Biofilter	Zilli et al.(2005)
polyurethane	30-40	Biofilter	Eun-lee et al.(2009)
LECA (soil)	34.1	Biofilter	ชลันดา คุ่มวงษ์(2011)

ตารางที่ 2.9 เปรียบเทียบการการบำบัดเบนซินด้วยแสงในงานวิจัยอื่นๆ

Concentration (ppm)	RT (min)	Conversion (%)	ชนิดของ ระบบ	reference
15.7	0.08	30 - 80	UV	Hennezel et al. (1998)
50 - 160	2.94	>95%	UV	Wen Wang et al. (2003)
60	6.34	95%	Fluorescent	Lichtin and Sadeghi (1998)