



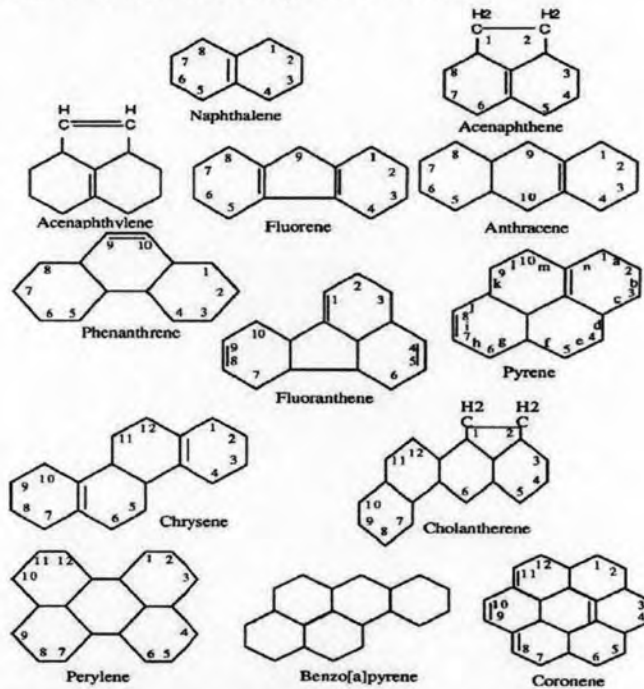
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

##### 2.1.1 นิยาม

สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งภายในโมเลกุลประกอบด้วยเบนซีนต่อกันตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนและอะตอมของธาตุไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก มีสมบัติเป็นพิษต่อมนุษย์ พิษและสัตว์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ

(Nagpal et al., 1993)

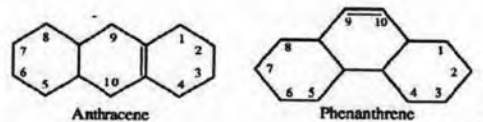
##### 2.1.2 สมบัติ

สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นดังนี้

1. เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น ปฏิริยาออกซิเดชัน รั้ดักซันและการกลายเป็นไอ (Evaporization) เกิดได้ยากขึ้น รวมทั้งทำให้ค่าการละลายน้ำลดลง

2. หมู่แอลคิล ( $\text{CH}_2$ -group) ส่งผลต่อค่าการละลายน้ำของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ถ้ามีหมู่แอลคิลในโมเลกุล ค่าการละลายน้ำของสารประกอบกลุ่มนี้จะลดลง แต่มีข้อยกเว้นสำหรับสารบางตัว เช่น benz[a]anthracene ที่ไม่มีหมู่แอลคิลในโมเลกุลแต่กลับมีค่าการละลายน้ำน้อยกว่า methyl หรือ ethylbenz[a]anthracene ที่มีหมู่แอลคิลเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล เป็นต้น

3. การจัดเรียงโมเลกุลของสารประกอบกลุ่มนี้ส่งผลต่อค่าการละลายน้ำ สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นเส้นตรง จะมีค่าการละลายน้ำน้อยกว่าโมเลกุลที่มีการจัดเรียงแบบสามเหลี่ยมและแบบอื่น ๆ เช่น แอนทราซีนเป็นโมเลกุลที่มีการจัดเรียงเป็นเส้นตรงมีค่าการละลายน้ำน้อยกว่าฟิแนนทรินที่มีการจัดเรียงโมเลกุลเป็นแบบสามเหลี่ยม เป็นต้น

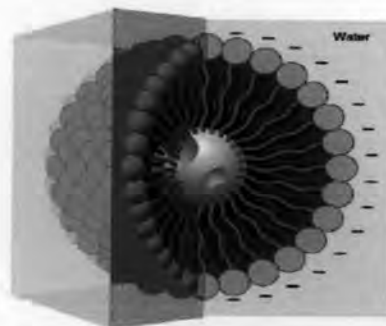


รูปที่ 2.2 การจัดเรียงโมเลกุลแบบเส้นตรงและแบบสามเหลี่ยม

(Nagpal et al., 1993)

4. ค่าคงที่การละลายในน้ำ-ออกทานอล ( $K_{ow}$ ) ของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 3 - 7 เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสารสารอินทรีย์กลุ่มนี้เป็นวงเบนซิน จึงทำให้มีขั้วต่ำจึงให้ละลายน้ำได้น้อย

5. จุดเดือดอยู่ระหว่าง 150 - 325 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 101 - 438 องศาเซลเซียส การระเหยกลายเป็นไอจะเกิดขึ้นได้ดีกับสารประกอบที่มีวงเบนซิน 2 - 3 วงหรือสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ๆ นั่นเอง



รูปที่ 2.3 สารลดแรงตึงผิวล้อมรอบด้วยสารอินทรีย์อยู่ในรูปของไมเซลล์ (Micelle)

(Muller, 2004)

6. สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) สามารถทำให้สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนละลายน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวจะไปจับกับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ และส่วนหัวที่ชอบน้ำสามารถละลายน้ำได้ เปรียบได้ว่าสารลดแรงตึงผิวเป็นตัวพาสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ให้มาอยู่ในน้ำได้มากขึ้น ในบางสภาวะ สารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกันในรูปของไมเซลล์ (Micelle) ซึ่งเป็นรูปแบบการรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวเป็นรูปทรงกลม โดยส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะมารวมตัวกันและหันส่วนหัวที่ชอบน้ำออกมาสัมผัสกับน้ำ ไมเซลล์จะช่วยให้สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้น้อยเข้าจับกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำภายในไมเซลล์ซึ่งทำให้สารอินทรีย์อยู่ในน้ำได้ดีมากยิ่งขึ้นเพราะไม่ต้องสัมผัสกับน้ำโดยตรง (Neff, 1979)

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติและข้อมูลทั่วไปของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Nagpal et al., 1993)

<i>PAH</i>	<i>Mol. Wt.</i> (g)	<i>Solubility</i> <i>at 25 °C</i> (µg/L)	<i>Vap. Pressure</i> <i>at 25 °C</i> (mm Hg)	<i>Log Kow</i> ( <i>Log Koc</i> )	<i>Carcino-</i> <i>genicity</i>	<i>Benzene</i> ( <i>and total</i> ) <i>rings</i>
Naphthalene	128.2	12500 to 34000	$1.8 \times 10^{-2}$	3.37	NC	2
Acenaphthylene	152.2	3420	$10^{-3} - 10^{-4}$	4.07 (3.40)	NC	2
Acenaphthene	154.2			3.98 (3.66)	NC	2
Fluorene	166.2	1900		4.18 (3.86)	NC	2 (3)
Anthracene	178.2	59	$2.4 \times 10^{-4}$	4.5 (4.15)	NC	3
Phenanthrene	178.2	900	$6.8 \times 10^{-4}$	4.46 (4.15)	NC	3

7. สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยแบ่งตามสมบัติความเป็นพิษ ดังนี้

7.1. สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ (The Lower Molecular Weight PAHs) ประกอบด้วยวงเบนซีนเพียง 2 - 3 วง เช่น แนฟทาลีน ฟลูออรีน พีแนนทรีน เป็นต้น สารประกอบกลุ่มนี้ก่อให้เกิดพิษในสิ่งมีชีวิตในน้ำแบบเฉียบพลัน

7.2. สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลสูง (The High Molecular Weight PAHs) ประกอบด้วยวงเบนซีน 4 - 7 วง เช่น โคโรนีน สารประกอบกลุ่มนี้ไม่ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันแต่เป็นสารก่อมะเร็ง

### 2.1.3 แหล่งกำเนิด

แหล่งกำเนิดของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติและแหล่งกำเนิดจากมนุษย์

#### 1. แหล่งกำเนิดจากธรรมชาติ (Natural Sources)

1.1. ไฟไหม้ เช่น ไฟไหม้ป่า ไฟไหม้ทุ่งหญ้า ไฟไหม้ในเขตเกษตรกรรม ก่อให้เกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมากและตกลงบนพื้นดิน ผืนน้ำ

1.2. น้ำมันหรือเชื้อเพลิงซากฟอสซิล สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมีอยู่ในเชื้อเพลิงซากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ เป็นต้น ในกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในชั้นหินต่าง ๆ ในช่วงระยะเวลาการแข็งตัวและสลายตัวของชั้นหินนั้น สารประกอบกลุ่มนี้จะหลุดลอยออกมาและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ จะเห็นได้จากงานวิจัยในช่วงแรกๆที่เริ่มคำนึงถึงการปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อม Woo และคณะ (1978) ได้ทดสอบองค์ประกอบของถ่านหินพบว่า มีสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอยู่หลายชนิด Jasper และคณะ (1985) ได้ตรวจสอบสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำเสียและสลัดจ์ ซึ่งเก็บมาจากบริเวณที่มีการทำอุตสาหกรรมถ่านหินในประเทศแคนาดา พบว่ามีสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนในน้ำเสียและสลัดจ์ในระดับไมโครกรัมต่อลิตร

1.3. แหล่งธรรมชาติอื่น ๆ เช่น ภูเขาไฟระเบิด กระบวนการทางชีวภาพของแบคทีเรียหรือพืช แต่แหล่งกำเนิดจำพวกนี้ถือว่าก่อให้เกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจำนวนน้อยเมื่อเทียบกับไฟไหม้ในธรรมชาติ

#### 2. แหล่งกำเนิดจากมนุษย์ (Anthropogenic Sources)

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของสารอินทรีย์ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ล้วนแล้วแต่ก่อให้เกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนทั้งสิ้น เช่น การประกอบอาหารโดยใช้ถ่านซึ่งควันที่ออกมาจากการหุงต้มด้วยนั้น ก่อให้เกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้

ในเชิงอุตสาหกรรม การเผาไหม้น้ำมันหรือเชื้อเพลิงซากฟอสซิลนั้นเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ หรือในกิจกรรมการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ที่มีการใช้น้ำมัน เช่น การใช้รถยนต์ โดยที่สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะออกมาพร้อมกับควันจากท่อไอเสีย

ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้มีการนำสารประกอบกลุ่มนี้ไปใช้ประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมผลิตยา อุตสาหกรรมการผลิตสีย้อม

ตารางที่ 2.2 การนำสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนไปใช้ในอุตสาหกรรม (Nagpal et al., 1993)

<i>PAH</i>	<i>Commercial name( s)</i>	<i>Uses</i>
Acenaphthene	1,2- Dihydronaphthalene, 1,8- Dihydronaphthalene, 1,8- Ethylenaphthalene, Periethylene naphthalene,	Chemical intermediary in pharmaceutical & photographic industries; to a limited extent in the production of soaps, pigments and dyes, insecticides, fungicides, plastics, and processing of certain foods
Acridine	2,3,5,6-Dibenzo quinoline, 9 -Azanthracene, Benzo (b) quinoline	Laboratory chemical (as a dye) & to a limited extent in pharmaceuticals
Anthracene	Paranaphthalene, Tetar olive N2G, Green Oil	As a dye or chemical intermediary for dyes, diluent for wood preservatives
Fluorene	o-Biphenylenemethane, Diphenylenemethane	As a dye or chemical intermediary for dyes
Naphthalene		In the production of phthalic anhydride, carbaryl insecticide, beta-naphthol, tanning agents, moth repellent, and surfactants
Pyrene	Benzo[d, e, f] phenanthrene, Beta - pyrene	
Quinoline	1-Azanaphthalene, 1-Benzopyridine, Benzopyridine	In the preparation of hydroxyquinoline sulfate, niacin, some dyes; as a solvent for resins & terpenes; decarboxylation agent

เมื่อมีการนำสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม หากระบบบำบัดของโรงงานที่มีการนำสารประกอบกลุ่มนี้ไปใช้ มีการบำบัดที่ไม่มีประสิทธิภาพจะทำให้น้ำเสีย อากาศเสียที่หลุดออกมาจากโรงงานในปริมาณมากได้ ทำให้มีการปนเปื้อนในธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ปัจจุบันความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเจริญก้าวหน้าในแต่ละประเทศ ดังนั้นเมื่ออุตสาหกรรมกำลังเฟื่องฟูและมีการนำสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมาใช้ประโยชน์ จะทำให้การปนเปื้อนสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในธรรมชาติ จะยิ่งเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว และเนื่องจากยังไม่มียานวิทย์ใดที่จะบอกถึงผลกระทบและอาการที่เกิดจากการสะสม

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ในสิ่งมีชีวิตอย่างชัดเจน รวมไปถึงสมบัติที่เป็นสารก่อมะเร็ง ยังไม่มีผลการทดลองที่แน่ชัดว่าจะเกิดผลอย่างไรต่อมนุษย์ เพราะการทดลองยังทำในระดับห้องปฏิบัติการ หรือในสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น หนู เป็นต้น

นอกจากนี้ ในการขนส่งน้ำมันทางเรือซึ่งเดินทางผ่านมหาสมุทรต่าง ๆ นั้น ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในแหล่งน้ำ จากการรั่วไหลของน้ำมันจากการเดินเรืออีกด้วย ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำเป็นอย่างมาก เพราะสารประกอบกลุ่มนี้บางชนิดก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้

ตารางที่ 2.3 บริเวณที่พบสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Eisler, 1987)

Sources	Annual Input of TPAHs (metric ton)
ATMOSPHERE - Forest and prairie fires	19,513
- Agricultural burning	13,009
- Refuse burning	4,769
- Enclosed incineration	3,902
- Heating and power	2,168
total	43,361
AQUATIC ENVIRONMENTS - Petroleum spillage	170,000
- Atmospheric deposition	50,000
- Wastewaters	4,400
- Surface land runoff	2,940
- Biosynthesis	2,700
total	230,040

#### 2.1.4 แหล่งที่พบ

เมื่อเกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดการปนเปื้อนและตกค้างอยู่ในทุก ๆ ที่ในสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นในอากาศ ในน้ำ ในดิน ในเซลล์สิ่งมีชีวิต

นอกจากนี้ สังคมเมืองจะพบการสะสมของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมากกว่าสังคมชนเมืองและสังคมชนบท ทั้งนี้เป็นเพราะสังคมเมืองจะมีการใช้ยานพาหนะ การประกอบโรงงานอุตสาหกรรมที่มากกว่าสังคมชนบท ซึ่งกิจกรรมเหล่านี้ก่อให้เกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนทั้งสิ้น ดังนั้นสังคมเมืองจึงมี

ความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนของสารประกอบกลุ่มนี้เป็นอย่างมาก และควรที่จะหากระบวนการต่าง ๆ มากำจัดสารประกอบกลุ่มนี้ออกจากสิ่งแวดล้อมให้มากที่สุด

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยต่าง ๆ หาปริมาณสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างสังคมเมืองและสังคมชนเมืองหรือสังคมชนบท เช่น Delhomme และคณะ (2008) ได้หาความเข้มข้นของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำฝน โดยเก็บน้ำฝนจากเขตเมืองและเขตชนเมืองมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งพบว่าความเข้มข้นสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำฝนจากเขตเมือง มีความเข้มข้นมากกว่าน้ำฝนจากเขตชนเมือง และหาความเข้มข้นของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน 17 ชนิดที่ US Environmental Protection Agency (EPA) ประกาศว่าเป็นสารปนเปื้อนที่อาจก่อให้เกิดการกลายพันธุ์หรือเป็นสารก่อมะเร็งในน้ำฝนด้วยเทคนิค HPLC พบว่าพีแนทรีนมีความเข้มข้นมากที่สุดทั้งในเขตเมืองและเขตชนเมือง เป็นเพราะว่าพีแนทรีนเป็นสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่มากในควันบุหรี่และในควันรถยนต์ทำให้ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ จึงทำให้พบพีแนทรีนเป็นปริมาณมากในน้ำฝนซึ่งชะพีแนทรีนที่ลอยอยู่ในบรรยากาศให้ตกลงมานั่นเอง

สำหรับกิจกรรมในเขตเมืองที่มีความเสี่ยงสูงต่อการปนเปื้อนสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนนั้น นอกจากบริเวณโรงงานอุตสาหกรรม บริเวณสี่แยกที่มีการจราจรติดขัดแล้ว บริเวณสถานีบริการน้ำมันตามจุดต่าง ๆ หรือร้านซ่อมรถก็มีความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนด้วยสูงเช่นกัน เพราะภายในสถานีบริการมีน้ำมันประเภทต่าง ๆ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสารประกอบกลุ่มนี้ และการปนเปื้อนจากกิจกรรมต่าง ๆ ภายในสถานีบริการน้ำมันเกิดขึ้นได้ง่าย เช่น การรั่วไหลของน้ำมันระหว่างเติมน้ำมัน ควันจากรถยนต์และยานพาหนะต่าง ๆ ขับเข้ามาเติมน้ำมัน เป็นต้น สถานีบริการน้ำมันในเขตเมืองมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนในอากาศ บนผิวดินและในน้ำไม่ว่าจะเป็นน้ำฝนที่ชะพาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ในอากาศให้ตกลงมาและปนเปื้อนในน้ำฝน หรือน้ำจากกิจกรรมต่าง ๆ ภายในสถานีบริการ เช่น น้ำจากการล้างรถ ก็จะชะพาสารประกอบกลุ่มนี้ที่ปนเปื้อนบนพื้นดินมากับน้ำได้ด้วย

จะเห็นได้ว่าสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สามารถปนเปื้อนไปในสิ่งแวดล้อมได้ทุก ๆ ที่ แต่สารประกอบกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ก็มักจะมารวมตัวและสะสมกันอยู่ในน้ำ ทั้งนี้เพราะเมื่อสารประกอบกลุ่มนี้ลอยอยู่ในอากาศ น้ำฝนก็จะชะลงสู่พื้นดิน

และไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ส่วนสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่ในพื้นดินนั้นก็จะถูกน้ำชะพาแล้วไหลลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติเช่นกัน ดังนั้น การกำจัดสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ในน้ำจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพราะว่าไม่ใช่แค่การปนเปื้อนในน้ำจะเป็นแหล่งรวมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมากเท่านั้น อีกเหตุผลหนึ่งซึ่งทำให้นักวิจัยทั้งหลายสนใจศึกษาวิธีการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน มาเป็นเวลานานร่วมทศวรรษ และยังคงทำการศึกษางานด้านนี้อย่างต่อเนื่อง ก็เป็นเพราะผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลายที่ได้รับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนอยู่ส่วนต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ

### 2.1.5 ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต

การปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในสิ่งแวดล้อมได้แก่ ในน้ำ ในดิน บนดินและในบรรยากาศก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต สาเหตุที่ทำให้เกิดผลเสียเป็นเพราะสารประกอบกลุ่มนี้ย่อยสลายได้ยาก ดังนั้นนอกจากการปนเปื้อนแล้ว การย่อยสลายได้ยากจะทำให้เกิดการสะสมในสิ่งแวดล้อมต่อไป จึงทำให้สิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ได้รับสารกลุ่มนี้ได้ง่ายยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสะสมของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำ จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตเป็นวงกว้าง เพราะน้ำเป็นตัวพาที่ดีจึงทำให้สามารถนำพาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ผ่านผิวหนังหรือผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้ จึงทำให้เกิดการสะสมของสารพิษในร่างกายสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ก่อให้เกิดโรคมะเร็งในปลา ก่อให้เกิดเนื้องอกตามอวัยวะภายในต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากสัตว์น้ำแล้ว สิ่งมีชีวิตที่อยู่บริเวณใกล้เคียงก็สามารถรับผลกระทบและสะสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในร่างกายหรือภายในเซลล์ได้เช่นกัน เช่น ต้นไม้หรือสัตว์ต่าง ๆ ที่ดื่มกินน้ำจากแหล่งน้ำที่ปนเปื้อน เป็นต้น จากงานวิจัยต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาพบว่า น้ำที่มีการปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งจะขอกกล่าวถึงสิ่งมีชีวิต 6 กลุ่ม ได้แก่ เห็ดรา พืช สิ่งมีชีวิตในน้ำ สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำ สัตว์เลื้อยคลาน นกและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

1. เห็ดรา สิ่งมีชีวิตในกลุ่มนี้สามารถย่อยสลายสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ โดยจะนำมาใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์และเปลี่ยนสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ไปเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เมื่อนำ *Salmonella typhimurium* (Cemiglia et al. 1985) มาเลี้ยงเชื้อร่วมกับแบคทีเรียโดยที่อาหารเลี้ยงเชื้อมีสารประกอบโพลีไซคลิกอะโร



มาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ พบว่า โคโลนิของแบคทีเรียมีอัตราการกลายพันธุ์ลดลง เนื่องจาก *Salmonella typhimurium* มีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วซึ่งทำให้สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนถูกกำจัดออกไปจากอาหารเลี้ยงเชื้อ ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้ไม่สามารถไปทำให้เซลล์แบคทีเรียเกิดการกลายพันธุ์ได้มากนักนั่นเอง

2. พืช พบว่ามีการลำเลียงสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากส่วนของรากและไปสะสมยังส่วนต่าง ๆ ของต้นซึ่งส่วนที่พบมากที่สุดได้แก่ ส่วนของเปลือกไม้ นั้นแสดงให้เห็นว่าพืชสะสมสารประกอบชนิดนี้เอาไว้ได้ ส่วนผลของสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ที่มีต่อพืชนั้น ยังไม่มีงานวิจัยให้ความสนใจมากนัก

3. สิ่งมีชีวิตในน้ำ พบว่าเมื่อสิ่งมีชีวิตในน้ำแต่ละชนิดได้รับสารปนเปื้อนจะก่อให้เกิดเนื้องอกตามบริเวณต่าง ๆ และอาจเกิดความผิดปกติกับระบบภายในร่างกาย เช่น การสะสมฟลูออรีนมีผลต่อระบบการสืบพันธุ์ของปลาโลมา การสะสม benzo(a)pyrene ทำให้อัตราการหายใจและอัตราการเต้นของหัวใจในหอยแมลงภู่มลดลง การสะสมของฟลูออรีนและพีแนนทรีน ยับยั้งการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย การสะสมของ 3-methylcholanthrene ทำให้รูปร่างของเซลล์เม็ดเลือดแดงในหอยแมลงภู่มผิดปกติ เป็นต้น

4. สัตว์ครึ่งบกครึ่งน้ำและสัตว์เลื้อยคลาน การสะสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนทำให้เกิดเนื้องอกกับสัตว์ในกลุ่มนี้ เช่น การสะสมของไพรีนทำให้เกิดเนื้องอกในตับ หรืออาจจะพบการเกิดเนื้องอกบนผิวหนังของซาลาแมนเดอร์ เป็นต้น

5. นก มีงานวิจัยที่ได้ทดลองผสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนลงไปในการอาหาร (4,000 มก./กก.) และให้กินเป็นเวลา 6 เดือนจากลักษณะภายนอกจะมองไม่เห็นถึงความผิดปกติใด ๆ แต่เมื่อทำการศึกษาระบบภายในร่างกาย พบว่าน้ำหนักของตับเพิ่มขึ้นอัตราการสูบฉีดเลือดไปยังตับเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับนกกลุ่มที่ไม่กินอาหารที่ปนเปื้อนสารประกอบกลุ่มนี้ นอกจากนี้ยังพบว่า สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนยังทำให้เกิดความผิดปกติของเอมบริโอทำให้อัตราการรอดชีวิตลดลง หรือหากมีตัวอ่อนที่รอดชีวิตก็จะมี ความผิดปกติเกิดขึ้น

6. สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม การสะสมของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สามารถทำให้เกิดเนื้องอกในสัตว์กลุ่มนี้ได้อาจจะแสดงอาการอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาเพียง 4 - 8 สัปดาห์เท่านั้น หากมีการสะสมสารปนเปื้อนในหน่วยไมโครกรัมต่อลิตร นอกจากนั้นยังมีอาการอื่น ๆ อีก เช่น การสะสมของ 3-methylcholanthrene ในร่างกายหนู

จะทำลายต่อมไทมัสซึ่งอาจจะเกิดพิษแบบเรื้อรังหรือเฉียบพลันขึ้นกับความเข้มข้นของ 3-methylcholanthrene ที่สะสมอยู่ใน

อวัยวะเป้าหมายที่สารประกอบกลุ่มนี้ไปสะสมและก่อให้เกิดเนื้องอกนั้นแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารปนเปื้อน เช่น การสะสมของ 7, 12-dimethylbenz(a)anthracene อวัยวะเป้าหมายคือตับ รองลงมาคือผิวหนัง เป็นต้น

อาการที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นแบบเฉียบพลันหรือแบบเรื้อรังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนดังตาราง

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างแสดงค่าความเข้มข้นที่ก่อให้เกิดพิษแบบเรื้อรังและแบบเฉียบพลันในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Eisler, 1987)

Effect (units), organism, PAH compound	Concentration	Reference <sup>a</sup>
LD-50, Acute oral (mg/kg body weight)		
Rodents ( <i>Rattus</i> spp., <i>Mus</i> spp.)		
Benzo (a) pyrene	50	Sims and Overcash 1978
Phenanthrene	700	
Naphthalene	1,780	
Fluoranthene	2,000	
Carcinogenicity, chronic oral (mg/kg body weight)		
Rodents		
7,12-dimethylbenz (a) anthracene	0.00004-0.00025	Lo and Sandi 1978
Benzo (a) pyrene	0.002	Sims and Overcash 1978
Dibenz(a,h) anthracene	0.006	
Benz (a) anthracene	2.0	
Benzo (b) fluoranthene	40.0	
Benzo (k) fluoranthene	72.0	
Indeno (1,2,3-cd)	72.0	
Chrysene	99.0	
Anthracene	3,300.0	

จากสิ่งมีชีวิตทั้ง 6 กลุ่มที่ได้รับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนนั้นจะเห็นได้ว่ามีอาการแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ชนิดของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ไปสะสมในร่างกาย สายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต เป็นต้น ซึ่งระยะเวลาในการแสดงอาการส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปแบบการเกิดพิษแบบเรื้อรัง คือสะสมสารปนเปื้อนไปทีละน้อยจนเกิดความผิดปกติขึ้น ทำให้สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นเหมือนภัยเงียบที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมและภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย

ซึ่งหากมีอาการผิดปกติเกิดขึ้นก็อาจจะสายเกินการที่จะเยียวยาอาการผิดปกติเหล่านี้ได้ และที่สำคัญการวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ในมนุษย์นั้น เป็นเพียงการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ที่ใช้เซลล์หรือหนูทดลองมาทำการทดลองเท่านั้น จึงยังไม่เป็นที่ทราบกัน อย่างแน่ชัดว่า การสะสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในร่างกายมนุษย์นั้น จะมีระยะเวลาการสะสมสารพิษนานเท่าไร และก่อให้เกิดผลอย่างไร ในขณะที่ปัจจุบัน การปนเปื้อนของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนกลับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งจำเป็น อย่างยิ่งที่จะต้องกำจัดการประกอบกลุ่มนี้ที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมให้มีปริมาณลดลงให้มากที่สุด โดยเฉพาะการปนเปื้อนในแหล่งน้ำที่เปรียบเสมือนแหล่งกักเก็บสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ จึงทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สนใจที่จะหาวิธีการกำจัดการประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ออกจากแหล่งน้ำให้มากที่สุด

สำหรับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่งานวิจัยนี้สนใจ จะกำจัดออกจากน้ำได้แก่ พีแนนทรินและฟลูออรีน ด้วยเหตุผลดังนี้

1. พีแนนทริน พบว่าเป็นสารปนเปื้อนหลักในน้ำฝน สาเหตุที่เป็นสารพิษหลักในน้ำฝนเพราะพีแนนทรินอยู่ในควันรถยนต์ ควันบุหรี่ที่ลอยลอยอยู่ในบรรยากาศ เมื่อฝนตกจึงทำให้ ชะพาพีแนนทรินตกลงมาด้วย และสุดท้ายก็จะไปสะสมอยู่ในแหล่งน้ำธรรมชาติ ในสภาพสังคม ปัจจุบันมีอัตราการใช้รถยนต์ จักรยานยนต์เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดมลภาวะมากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะในสังคมเมือง ดังนั้น พีแนนทรินถือว่าเป็นสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในปริมาณมากในสภาพ สังคมปัจจุบัน อีกทั้งผลที่เกิดขึ้นจากการสะสมพีแนนทรินในปริมาณมากในร่างกายโดยเฉพาะใน สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมสามารถก่อให้เกิดพิษแบบเฉียบพลันได้

2. ฟลูออรีน พบว่านิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสีย้อมต่าง ๆ และน้ำเสียที่ ปล่อยออกมาจากโรงงานผลิตสีย้อมนั้นส่งผลเสียต่อสัตว์น้ำหลายชนิด พบว่าในกลุ่ม ของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงเบนซินจำนวน 2 - 3 วงนั้น ฟลูออรีน ก่อให้เกิดพิษต่อสัตว์น้ำหลากหลายชนิด จึงมีความเสี่ยงที่จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและสิ่งมีชีวิต ในน้ำเป็นอย่างมาก

นอกจากนี้ทั้งพีแนนทรินและฟลูออรีน ยังมีค่าการละลายสูงรองลงมาจาก แนนธาซีน ซึ่งการที่ทั้งพีแนนทรินและฟลูออรีนมีค่าการละลายสูงนั้นจะยิ่งทำให้สามารถ แพร่กระจายไปในน้ำและแพร่กระจายไปสู่สิ่งมีชีวิตในน้ำได้ดี เมื่อเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตในน้ำ ย่อมเกิดการสะสมภายในห่วงโซ่อาหารก่อให้เกิดผลเสียกระจายเป็นวงกว้างได้ง่าย

สำหรับการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนออกจากน้ำนั้นมีหลายกระบวนการที่สามารถกำจัดได้ เช่น ฟลิวคกุลเลชัน โคแอกกูเลชัน โอโซนเนชัน เป็นต้น พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำ แต่มีอยู่กระบวนการหนึ่งที่สามารถกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั่นคือ กระบวนการดูดซับ

## 2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลสารของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของสารตัวกลางซึ่งเป็นของแข็ง ในเชิงวิศวกรรมใช้กระบวนการดูดซับในการบำบัดโมเลกุลหรือคอลลอยด์ในรูปของเหลวหรือก๊าซ โดยเรียกโมเลกุลหรือคอลลอยด์นั้นว่า Adsorbate และเรียกของแข็งที่มีพื้นผิวให้สารละลายและอนุภาคขนาดเล็กมาเกาะจับว่า Adsorbent

แรงในการดูดซับ (Adsorption Force) ได้แก่ แรงกายภาพ แรงเคมี แรงกายภาพและเคมี

### 2.2.1 ตัวกลางที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ (Adsorbent)

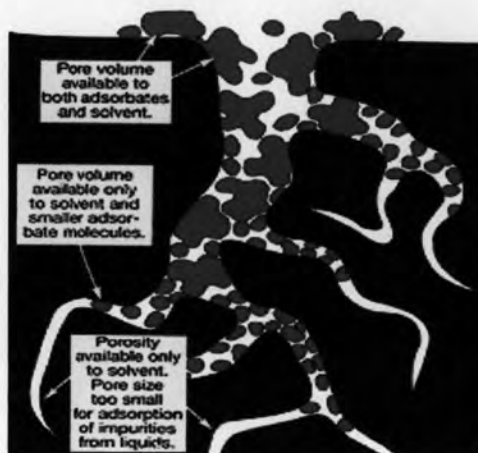
สารตัวกลางมี 3 ประเภท ได้แก่ สารอนินทรีย์ (Inorganic Adsorbent) สารอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthesized Organic Resin) ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

1. สารอนินทรีย์ (Inorganic Adsorbent) ได้แก่ ดินเหนียวต่าง ๆ ถ่านกระดูก แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Mg(OH)_2$ ) ซีโอไลต์และแอคติเวเตดซิลิกา มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 20 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวกลางประเภทนี้สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ต้องการบำบัดได้ไม่กี่ชนิด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการให้ความร้อน

2. สารอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthesized Organic Resin) โดยทั่วไปใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดสารอินทรีย์ มีพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 300 - 500 ตารางเมตรต่อกรัม สารอินทรีย์สังเคราะห์มีข้อดีคือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าตัวกลางชนิดอื่น ๆ โดยใช้สารเคมีราคาถูก เช่น เกลือแกง

3. ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสอยู่ระหว่าง 600 - 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมในการนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในกระบวนการต่าง ๆ

ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon) และถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon)



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Norit , 2008)

3.1 ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon) มีขนาดเท่ากับ 15 - 20 ไมครอน มักใช้เติมในเส้นท่อภายในถังกวนเร็วและถังกวนช้า

- ข้อดี
- ราคาถูก
  - ปรับปริมาณได้ง่าย
  - ลงทุนต่ำ
  - เกิดปฏิกิริยาได้เร็วเพราะมีขนาดเล็ก

- ข้อเสีย
- นำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ยาก
  - สามารถลดปริมาณสารลงได้แต่ไม่หมด
  - ไม่ควรใช้เกิน 25 - 50 มก./ล.

3.2 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon) มักนิยมบรรจุถังและใช้ในลักษณะการกรองน้ำ ตำแหน่งของระบบมักจะอยู่หลังถังกรองน้ำ

- ข้อดี
- เพิ่มประสิทธิภาพถังกรองแบบธรรมดา
  - นำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ได้ง่าย

- ข้อเสีย
- มีโอกาสสูญเสียคาร์บอน 5 % ในการนำกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 2.5 ถ่านกัมมันต์แบบผงและถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Chemviron Carbon, 2009)

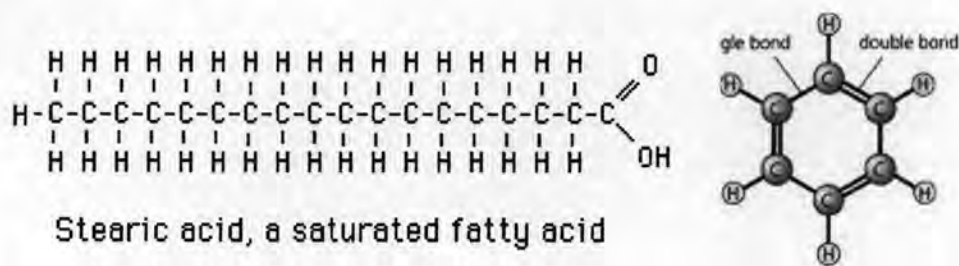
### 2.2.2 โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ต้องการบำบัด (Adsorbate)

สำหรับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ต้องการบำบัด ในที่นี้ขอกล่าวถึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดได้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการต่าง ๆ ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และยังนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการดูดซับเพื่อกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอีกด้วย

ประเภทของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดได้มีดังนี้

- สี กลิ่น รส จุลินทรีย์ สารอินทรีย์ เช่น กรดฮิวมิก กรดฟัลวิกและกลิน เช่น  $H_2S$
- คลอรีนในน้ำ มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดโดยปล่อยน้ำให้ไหลผ่านเป็นเวลานาน
- โลหะหนักต่าง ๆ สามารถกำจัดปรอท (Hg) และเงิน (Ag) รวมไปถึงสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่น ๆ จนถึงระดับที่ยอมให้มีในน้ำดื่มได้
- ยาฆ่าแมลงและวัชพืช สามารถใช้ถ่านกัมมันต์ทั้งสองแบบ
- ผงซักฟอกและสารลดแรงตึงผิวอื่น ๆ ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (90 %) มีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบผง (50 %)
- ฟีนอลและสารประกอบฟีนอล ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสามารถบำบัด ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลได้ถึง 100 %
- สารไฮโดรคาร์บอน ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้ แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่าถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบอิ่มตัว (Saturated Hydrocarbon) ได้ดี เพราะว่าการที่โมเลกุลจะสามารถดูดซับบนตัวกลางได้ดีนั้นจะต้องเป็นโมเลกุลที่มีค่าการละลายน้ำสูง หรือสามารถละลายน้ำได้ เพื่อให้โมเลกุลเหล่านั้นสามารถไปเกาะกับตัวกลางซึ่งอยู่ในน้ำได้ แต่สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบวงแหวน (Aromatic Hydrocarbon) ซึ่งมีค่าการละลายน้ำต่ำ จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 2.6 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรงและแบบวงแหวน  
(บริษัท ดีอีไอ (ไทยแลนด์) จำกัด, 2008; Stavig et al., 2004)

### 2.2.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการดูดซับ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพและความสามารถในการดูดซับโมเลกุลหรือ คอลลอยด์ของถ่านกัมมันต์เป็นดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์ไม่สามารถจับสารโมเลกุลขนาดเล็กและโมเลกุลแบบมีขั้ว (Polar Molecule) เช่น แอลกอฮอล์ธรรมดา กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็กและน้ำตาล เป็นต้น

2. ความมีขั้วของโมเลกุล (Polarity) จะลดลง เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลถึงความสามารถในการดูดซับ เมื่อมองกลับไปดูถึงสมบัติของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะเห็นว่าสารประกอบกลุ่มนี้มีความเป็นขั้วต่ำ เห็นได้จากโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นสารประกอบอะโรมาติกซึ่งมีความเป็นขั้วต่ำอยู่แล้ว และถ้าสารประกอบไฮโดรคาร์บอน กลุ่มนี้มีมวลโมเลกุลสูงก็ยิ่งทำให้ความมีขั้วของโมเลกุลยิ่งต่ำลงไปด้วย ถือว่า สมบัติความเป็นขั้วต่ำของสารประกอบชนิดนี้เป็นข้อจำกัดข้อหนึ่งในกระบวนการดูดซับ

3. ความสามารถในการดูดซับ (Adsorbility) แปรผันตรงกับการละลายน้ำของโมเลกุล แต่สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนนั้นมีค่าการละลายน้ำต่ำ ซึ่งถือเป็นปัญหาอีกข้อหนึ่งในกระบวนการดูดซับของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนนั้นละลายน้ำได้ไม่ดีและความเป็นขั้วต่ำ ซึ่งสองประเด็นนี้ถือเป็นปัญหาหลักในการกำจัดสารประกอบกลุ่มนี้ด้วยกระบวนการดูดซับ ซึ่งปัจจุบันปัญหาของการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนด้วยกระบวนการดูดซับนี้ นักวิจัยทั้งหลายพยายามแก้ปัญหาและเพิ่มความสามารถในกระบวนการดูดซับ โดยจะเห็นได้จากงานวิจัยที่มี

แนวทางการพัฒนากระบวนการดูดซับของสารประกอบชนิดนี้มากขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ "แนวทางการปรับปรุงกระบวนการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน"

### 2.3 การกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

ปัจจุบันในกระบวนการดูดซับเพื่อกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนนั้น ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon, AC) (Cooney, 1999) เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก มีความพรุนมากซึ่งนับเป็นข้อดีที่จะทำให้สามารถกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ แต่มีข้อเสียคือถ่านกัมมันต์มีราคาแพง และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ยาก (Lalvani et al., 1998) ดังนั้นในปัจจุบันจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยเป็นจำนวนมากสนใจที่จะหาตัวดูดซับชนิดใหม่ ที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าถ่านกัมมันต์และมีราคาย่อมเยากว่าถ่านกัมมันต์ (Boving and Zhang, 2004; Gruta et al., 2002; Mckay, 1995; Mackay and Gschwend, 2000; Zheng et al., 2004) ซึ่งตัวดูดซับที่เป็นทางเลือกใหม่ที่นักวิจัยนิยมนำมาศึกษานั้นก็คือ เศษวัสดุและเส้นใยจากธรรมชาติ

งานวิจัยในช่วงแรกนั้นยังไม่ได้มีแนวทางที่จะนำเส้นใยจากธรรมชาติมาทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารประกอบ แต่จะเป็นการศึกษาการสะสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในเนื้อเยื่อของพืช อาทิ เปลือกไม้ (Douce et al., 1997) ศึกษาการสะสมสารประกอบในเตตรโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในเปลือกไม้ พบว่าเปลือกไม้สามารถสะสมสารประกอบในเตตรโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ หลังจากนั้นเป็นต้นมาจึงมีงานวิจัยอีกมากมายที่สนับสนุนว่าเส้นใยธรรมชาติสามารถสะสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ เช่น การสะสมสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในรากข้าว (Jiao et al., 2007)

ต่อมาได้มีผู้สนใจที่จะนำเศษวัสดุธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติมาเป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนโดยตรง เศษวัสดุธรรมชาติที่นำมาใช้ในการดูดซับ เช่น เส้นใยจากนุ่น ต้นกก (Khan et al., 2007) เส้นใยจากไบบอร์เลย์ (Boki et al., 2007) เส้นใยจากต้นเอสเพน (Boving and Zhang, 2004) เส้นใยจากชานอ้อย กาบมะพร้าว ไคติน ไคโตซาน (Crisafully et al., 2007)

งานวิจัยเหล่านี้แบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ กลุ่มที่ทำการทดลองโดยการให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์และกลุ่มที่ทำการทดลองแบบที่ละเท



สำหรับงานวิจัยที่ทำการทดลองโดยการให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนดังนี้

การศึกษาการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากน้ำที่ชะผิวดินเพื่อป้องกันการปนเปื้อนลงไปสู่ น้ำใต้ดินโดยใช้เศษวัสดุธรรมชาติคือเส้นใยจากต้นเอสเพน (Boving and Zhang, 2004) พบว่าประสิทธิภาพของเส้นใยจากต้นเอสเพนในการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในช่วงแรก สามารถกำจัดได้เร็วและมีประสิทธิภาพสูงมากกว่า 95 % แต่หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง เพราะเศษไม้ที่นำมาใช้นั้นไม่ได้ผ่านการคัดขนาด เศษไม้ที่ใช้ดูดซับจึงมีขนาดใหญ่ จึงพบว่าพื้นที่ผิวเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

สำหรับงานวิจัยที่ให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ ส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการทดลองนานเพื่อศึกษาผลระยะยาวและใช้กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) เข้าร่วมด้วย ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดมักจะมีมากกว่า 95 % เช่น การนำเศษวัสดุธรรมชาติมาใช้เป็นตัวดูดซับร่วมกับกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพในการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำใต้ดิน (Seo et al., 2007) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เปลือกไม้เนื้อแข็งเป็นตัวดูดซับ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง (77 - 99.99 %) และใช้เวลานานถึง 7 เดือน

งานวิจัยที่ให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ใช้ความเข้มข้นของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนค่อนข้างต่ำเนื่องจากสารประกอบชนิดนี้มีความเป็นพิษสูง มักใช้ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เช่น 20 มก./ล. (Seo et al., 2007) หรือใช้ความเข้มข้นในหน่วยนาโนกรัมต่อลิตร เช่น 1 - 50 นก./ล. (Boving and Zhang, 2004) และใช้อัตราการไหลต่ำ ๆ (Boving and Zhang, 2004; Cottin and Merlin, 2008; Seo et al., 2007)

สำหรับการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนโดยวิธีที่ละเท่นั้น ส่วนใหญ่จะใช้ระยะเวลาในการทำการศึกษาน้อยกว่าการใช้คอลัมน์เพื่อศึกษาไอโซเทอม (Boki et al., 2007) และประสิทธิภาพการกำจัดขั้นต้นจะเห็นได้จากงานวิจัยต่อไปนี้

การกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันโดยใช้ตัวดูดซับที่มาจากธรรมชาติซึ่งมีราคาถูก (Crisafully et al., 2008) ซึ่งตัวดูดซับที่นำมาศึกษานั้น ได้แก่ ชานอ้อย กาบมะพร้าว ไคติน และไคโตซาน ในการวิจัยจะใช้สารละลายโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนความเข้มข้น 5 - 15 มก./ล. อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส พีเอช 7.5 พบว่าการดูดซับไอโซเทอมเป็นไปตามสมการของฟรุนด์ลิช ความสามารถในการดูดซับเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ กาบมะพร้าว > ชานอ้อย > ไคติน >

โคโคซาน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ เซลลูโลส ซิลิกา แอมเบอร์ไลท์ ผลที่ได้พบว่า ความเข้มข้นที่ตัวดูดซับแต่ละตัวสามารถดูดซับได้ ถ่านกัมมันต์ สามารถดูดซับได้สูงที่สุด (0.782) รองลงมาคือกาบมะพร้าว (0.553) ตามมาด้วยชานอ้อย (0.345) โคโคติน (0.215) ซิลิกา (0.123) โคโคซาน (0.112) และเซลลูโลส (0.101) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับที่มาจากเศษวัสดุธรรมชาติและเส้นใยธรรมชาติก็มีประสิทธิภาพในการดูดซับ สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ดีเช่นกัน

## 2.4 แนวทางการปรับปรุงกระบวนการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

ในการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนไม่ว่าจะเป็น การทดลองแบบคอลัมน์หรือที่ละเท จะพบว่าเส้นใยธรรมชาติมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่เหมาะสมต่อการดูดซับ (Boving and Zhang, 2004; Crisafully et al., 2007; Khan et al., 2007; Seo et al., 2007) แต่เมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมากกว่าเส้นใยธรรมชาติ (Crisafully et al., 2008)

### 2.4.1 การปรับสภาพตัวดูดซับ

ปัจจุบันแนวทางการกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นการนำเส้นใยจากธรรมชาติมาใช้ในการดูดซับและมีการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโดยใช้ สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) (Alila1 et al., 2007; Alila et al., 2005; Aloulou et al., 2004; Amelina et al., 2001; Amelina et al., 2000; Boufi et al., 2006; Fras-Zemljic et al., 2006; Hui-feng et al., 2001; Qu et al., 2008)

ในเส้นใยธรรมชาติประกอบไปด้วย ลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและอื่น ๆ องค์ประกอบที่มีความสำคัญต่อการดูดซับของสารประกอบที่มีขั้วต่ำ คือ ลิกนิน (Boving and Zhang, 2004; Crisafully et al., 2008; Mackay and Gschwend, 2000) เพราะลิกนินเป็น เส้นใยโพลีเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกน้อย จึงเป็นเส้นใยที่มีความเป็นขั้วต่ำ (Boufi et al., 2006; Sun et al., 2008) การดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีความเป็นขั้วต่ำ สำหรับเส้นใยธรรมชาติ แทนที่จะมีการหาเส้นใยที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุด ได้มีแนวทางใหม่ คือ การปรับปรุงเส้นใยเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบหลักในเส้นใยธรรมชาติอยู่แล้ว (Boufi et al., 2006; Sun et al., 2008) ให้มีความเหมาะสมต่อการดูดซับเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ เช่น

สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ในการปรับปรุงเส้นใยเซลลูโลสจะใช้เส้นใยเซลลูโลสสังเคราะห์มาทำการทดลอง (Alila et al., 2007; Alila et al., 2005; Amelina et al., 2001)

งานวิจัยในช่วงนี้ จึงเป็นการปรับสภาพเส้นใยเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ แต่เป็นการนำเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ หรือเส้นใยสังเคราะห์มาทำการศึกษาเบื้องต้น ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้สรุปตรงกันว่า การปรับสภาพเส้นใยด้วยการใส่สารลดแรงตึงผิว จะช่วยให้เส้นใยมีประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำได้ สารอินทรีย์ที่นิยมนำมาทำการวิจัยเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ๆ เช่น ไนโตรเบนซีน ฟีนอล แนนทาลีน เป็นต้น ส่วนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ เช่น สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ยังไม่ได้มีการศึกษาหาความสามารถในการดูดซับของตัวกลางที่มีการปรับสภาพเส้นใย สำหรับตัวปรับสภาพเส้นใยที่นิยมนำมาใช้ปรับสภาพคือ สารลดแรงตึงผิวประจุบวกซึ่งรายละเอียดของสารลดแรงตึงผิวที่จะสามารถช่วยให้ความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อนในน้ำได้ดั่งนั้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 2.5 สารลดแรงตึงผิว (Surfactant)

แรงตึงผิวเป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของน้ำหรือโมเลกุลของเหลวอื่น ๆ มีแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน โมเลกุลที่อยู่ด้านล่างจะมีแรงดึงดูดจากรอบด้าน โมเลกุลที่อยู่ผิวน้ำนั้น จะมีแรงดึงดูดจากโมเลกุลของเหลวรอบข้างที่อยู่ชิดติดกัน และมีแรงดึงดูดจากโมเลกุลของอากาศที่กระทำต่อผิวน้ำ แต่โมเลกุลของอากาศจะมีแรงดึงดูดที่กระทำต่อผิวน้ำน้อยมาก แรงดึงที่เกิดขึ้นจึงกลายเป็นแรงดึงจากด้านข้างทำให้ผิวน้ำมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้เหมือนแผ่นยาง ดังรูปจะเห็นว่าแมลงสามารถอยู่บนผิวน้ำได้

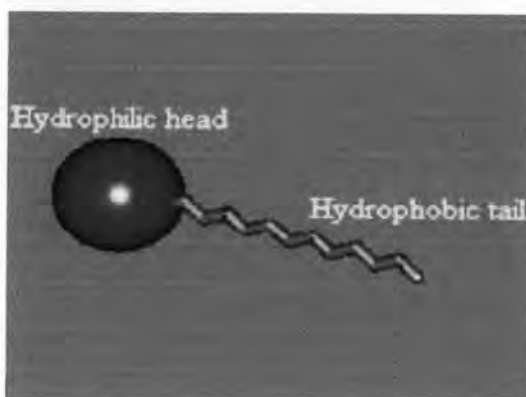


รูปที่ 2.7 ภาพพื้นผิวของน้ำที่มีคุณสมบัติเหมือนแผ่นยางเนื่องจากมีแรงตึงผิวสูง (วิชากร, 2007)

การทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลงทำได้โดยใส่สารเคมีชนิดหนึ่งลงไป สารเคมีจำพวกนี้เรียกว่า สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ซึ่งทำให้แรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลของน้ำไม่ยึดกันแน่นเหมือนเดิม จากภาพหากใส่สารลดแรงตึงผิวลงไป น้ำแมลงจะไม่สามารถเกาะอยู่บนผิวน้ำได้และจะจมลงไป

### 2.5.1 สมบัติ

สารลดแรงตึงผิวมีโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญได้แก่ ส่วนหัวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Head) และส่วนหางที่เป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Tail) แต่สามารถละลายหรือจับกับสารที่ไม่มีขั้วและสารที่มีขั้วต่ำได้ดี



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในของสารลดแรงตึงผิว (Behan, 1999)

เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวลงในน้ำในปริมาณน้อย รูปที่ 2.8 ช่ายสุดจะเห็นว่ามีส่วนหนึ่งอยู่บริเวณผิวน้ำและอีกส่วนหนึ่งอยู่ในน้ำ เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวมากขึ้นจะเห็นว่าส่วนที่อยู่บริเวณผิวน้ำจะลอยอยู่เต็มทั่วพื้นผิวน้ำ จนกระทั่งน้ำอึดตัวด้วยสารลดแรงตึงผิวแล้ว สารลดแรงตึงผิวที่อยู่ลึกลงไปในน้ำจะรวมตัวกันและรวมกลุ่มกันในรูปของไมเซลล์ (Micelle) ส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำจะรวมกันและหันส่วนหัวที่ชอบน้ำออกไป บางกรณีที่มีโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำอยู่ในน้ำก็จะไปอยู่ในแกนกลางของไมเซลล์ เพื่อทำให้โมเลกุลของตัวมันเองเสถียรและสามารถอยู่ในน้ำได้ ซึ่งสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจัดอยู่ในกลุ่มโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่สามารถเข้าไปอยู่ในแกนกลางของไมเซลล์ได้เช่นกัน เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำและมีขั้วต่ำ

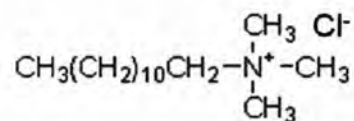


รูปที่ 2.9 การรวมตัวของสารลดแรงตึงผิวในรูปแบบไมเซลล์ (Behan, 1999)

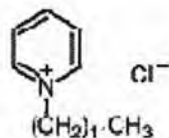
### 2.5.2 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวแบ่งได้เป็น 4 ประเภทโดยใช้ประจุไฟฟ้าของส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Head) เป็นเกณฑ์ ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic Surfactant) สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant) สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant) สารลดแรงตึงผิวที่มีสองประจุ (Amphoteric Surfactant หรือ Zwitterions) สำหรับสารลดแรงตึงผิวที่ช่วยเพิ่มความสามารถในกระบวนการดูดซับของเส้นใยเซลลูโลส เพื่อกำจัดสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ คือสารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant) สารลดแรงตึงผิวประจุบวกเป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วส่วนหัวที่ชอบน้ำ จะมีประจุเป็นบวก สาเหตุที่สารลดแรงตึงผิวประเภทนี้สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับ สารอินทรีย์ในน้ำได้ เพราะเส้นใยเซลลูโลสมีประจุสุทธิเป็นลบทำให้สามารถดึงดูดประจุตรงข้าม นั่นคือประจุบวกได้ดี เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวประจุบวกลงไปในการละลายเส้นใยเซลลูโลส จะทำให้ประจุบวกบนส่วนที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวมาเกาะบนพื้นผิวของเส้นใยที่มีประจุลบ และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำจะเป็นอิสระ ซึ่งจะสามารถไปจับกับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำ เหมือนกันได้ดี ทำให้สารปนเปื้อนที่มีขั้วต่า อย่างเช่นสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนสามารถจับกับส่วนหางของสารลดแรงตึงผิว ทำให้ช่วยลดปริมาณของ สารปนเปื้อนในกลุ่มนี้ออกไปจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้เส้นใย ที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวกซึ่งดูดซับสารอินทรีย์กลุ่มนี้ได้ไม่ดีนัก เพราะ เส้นใยเซลลูโลสมีประจุจึงไม่สามารถจับหรือทำให้สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีขั้วต่าได้ดีนัก ด้วยความที่สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน มีขั้วต่าย่อมจะชอบไปจับหรือเกาะกับโมเลกุลหรือตัวกลางที่ไม่มีประจุหรือมีขั้วต่าเช่นเดียวกัน

สารลดแรงตึงผิวประจุบวก ส่วนใหญ่เป็นสารจำพวกควอเทอร์นาเรียมแอมโมเนียม (Quaternium Ammonium) ค่าพีเอชที่สารจำพวกนี้ไม่สามารถทำงานได้ คือสภาวะที่เป็นด่างสูง (พีเอช 10 - 11) เพราะเกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salt) จะสูญเสียประจุบวก เมื่อสภาวะเป็นด่างทำให้เกิดการตกตะกอนได้ สารจำพวกนี้ไม่มีความสามารถในการทำควมสะอาดและไม่มีฟอง แต่สามารถเกาะเส้นผมและพื้นผิวได้ดี ให้ความลื่นจึงนิยมใช้ในครีมหวดผมหรือน้ำยาปรับผ้านุ่ม สารตัวอย่างในกลุ่มนี้ได้แก่ Dodecyltrimethylammonium chloride (DTAC) Dodecylpyridinium chloride (DPC) Polyethoxylated Tallow Amine (POEA) Benzalkonium Chloride (BAC) เป็นต้น



รูปที่ 2.10 Dodecyltrimethylammonium chloride (DTAC) (Iqbal et al., 2007)



รูปที่ 2.11 Dodecylpyridinium chloride (DPC) (Iqbal et al., 2007)

## 2.6 การปรับสภาพเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิว

ด้วยเหตุผลที่ว่า การใช้สารลดแรงตึงผิวจะช่วยเพิ่มความสามารถการดูดซับสารอินทรีย์ที่เป็นมลพิษในน้ำได้ เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักนั้นมีประจุลบ และสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดนั้นไม่มีประจุ จากสมบัติของสารลดแรงตึงผิวพบว่าสารเคมีจำพวกนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่เราต้องการได้ ด้วยการให้ส่วนหัวที่ชอบน้ำเกาะบนพื้นผิวของเส้นใย และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำจะสามารถจับกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำได้

มีงานวิจัยที่สนใจจะเปรียบเทียบว่า สารลดแรงตึงผิวประจุบวกหรือประจุลบที่สามารถปรับสภาพเส้นใยแล้วเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำได้ดีกว่ากัน (Liu et al., 2005) ด้วยการทดสอบประสิทธิภาพของการดูดซับสารประกอบอะโรมาติกบนเส้นใยผ้าที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวสองชนิด ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวประจุบวกคือ CTAC

(Cetyl Trimethylammonium Chloride) และสารลดแรงตึงผิวประจุลบคือ SDS (Sodium Dodecyl Sulfate) พบว่าสารลดแรงตึงผิวประจุบวกมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบอะโรมาติกมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประจุลบ ซึ่งสารประกอบอะโรมาติกที่ใช้ ได้แก่ Cyclacet Rosalva Ethylfenchol Dihydromyrcenol Carvone และ Dihydrojasmane

ดังนั้น สารลดแรงตึงผิวประจุบวกจึงมีความเหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำของเส้นใยเซลลูโลส นั่นคือ ถ้าหากนำสารลดแรงตึงผิวประจุบวกใส่ลงไป ส่วนหัวที่มีประจุเป็นบวกจะไปจับกับเส้นใยที่มีประจุเป็นลบ และส่วนหางซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวจะเป็นอิสระและจับกับคอลลอยด์ที่ละลายน้ำได้น้อย หรือมีความไม่ชอบน้ำเช่นกันได้ดี ดังนั้นสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจึงสามารถจับกับส่วนหางของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก ส่งผลให้การดูดซับบนผิวของเส้นใยเซลลูโลสมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สารลดแรงตึงผิวประจุบวกที่ใช้ในการศึกษามากเป็นโมเลกุลที่เป็นสายไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรง (Cation with Hydrophobic Chain) (Aloulou et al., 2004; Boufi et al., 2006; Qu et al., 2008) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวแบบโซ่ตรงที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมาก ๆ ตั้งแต่ 12 - 18 อะตอมเพื่อไปเกาะบนเส้นใยเซลลูโลส (Aloulou et al., 2004) พบว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากคือ octadecyl trimethylammonium bromide (C18) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ สำหรับงานวิจัยชิ้นอื่น ๆ ที่ทำในเรื่องนี้ก็มักได้ผลลัพธ์เป็นไปในทิศทางเดียวกันคือสารลดแรงตึงผิวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากที่สุดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีที่สุด (Aloulou et al., 2004; Boufi et al., 2006; Qu et al., 2008)

ปัจจุบันมีงานวิจัยสนใจทำให้เส้นใยเซลลูโลสมีประจุเป็นลบมากขึ้น เช่น การเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ลงไปในเส้นใย (Alila et al., 2007) และการเพิ่มประจุลบด้วยวิธีการรีฟลักซ์ (Boufi et al., 2006) ซึ่งทำให้สารลดแรงตึงผิวประจุบวกมาเกาะบนเส้นใยมากขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการดูดซับมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ค่าพีเอชมักใช้ค่าพีเอชที่เป็นกลาง (Aloulou et al., 2004) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (Aloulou et al., 2004; Boufi et al., 2006; Qu et al., 2008)

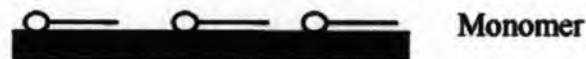
จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจำนวนคาร์บอนอะตอมมีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์บนตัวกลาง แต่ยังไม่มียงานวิจัยใดสนใจศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนส่วนที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว ว่าจะสามารถเพิ่มความสามารถในกระบวนการดูดซับได้หรือไม่ จึงทำให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสนใจที่จะศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันที่จะส่งผลต่อความสามารถใน

การดูดซับสารอินทรีย์บนตัวกลาง ซึ่งก่อนที่จะศึกษาผลของหมู่ฟังก์ชันนั้น จำเป็นจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกของการดูดซับสารลดแรงตึงผิวบนตัวกลางก่อน ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการวิจัยไว้ดังนี้

## 2.7 กลไกการดูดซับสารลดแรงตึงผิวประจุบวกบนเส้นใยเซลลูโลส

ปัจจุบันนิยมนำสารลดแรงตึงผิวมาเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการดูดซับ ทำให้มีนักวิจัยบางกลุ่มสนใจศึกษากลไกการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวกับเส้นใยที่ส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ (Alila et al., 2007; Alila et al 2005; Aloulou et al., 2004) พบว่า กลไกการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนเส้นใยเซลลูโลสมี 5 ช่วงดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่เริ่มใส่สารลดแรงตึงผิวลงไปทำให้มีสารลดแรงตึงผิวเกาะอยู่น้อย และแยกกันอยู่เป็นโมเลกุลเดี่ยว (Monomer) อยู่บนเส้นใยด้วยกลไกความต่างระหว่างขั้ว (Ion Exchange Mechanism)



รูปที่ 2.12 สารลดแรงตึงผิวเกาะบนเส้นใยในรูปโมโนเมอร์ (Alila et al., 2005)

ช่วงที่ 2 ช่วงนี้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวมีการมารวมตัวกันมากขึ้น จนเริ่มเกาะบนผิวของเส้นใยเป็นกลุ่มซึ่งเรียกว่าเฮมิไมเซลล์ (Hemimicelle) และยังมีสารลดแรงตึงผิวบางตัวที่แยกตัวออกมาเดี่ยว ๆ เรียกว่าโมโนเมอร์ (Monomer)



รูปที่ 2.13 สารลดแรงตึงผิวที่เกาะบนเส้นใยในรูปโมโนเมอร์และเฮมิไมเซลล์ Alila et al., 2005)

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่อิมตัวด้วยเฮมิไมเซลล์และรวมตัวกันเป็นโมโนเลเยอร์ (Monolayer) ช่วงนี้ประจุรวมจะเป็นกลาง



รูปที่ 2.14 สารลดแรงตึงผิวที่เกาะบนเส้นใยในรูปเฮมิไมเซลล์ Alila et al., 2005)

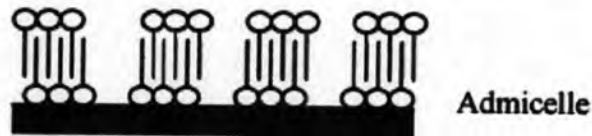


ช่วงที่ 4 ช่วงนี้สารลดแรงตึงผิวที่กระจายอยู่ในน้ำจะมารวมตัวกับสารลดแรงตึงผิวกลุ่มที่เกาะอยู่บนพื้นผิวเส้นใย โดยจะรวมตัวกันอยู่ในรูปไบเลเยอร์ (Bilayer) คือ มีสารลดแรงตึงผิวมาซ้อนกันสองชั้น ซึ่งเรียกรูปแบบการรวมตัวแบบนี้ว่า แอดไมเซลล์ (Admicelle) ในช่วงนี้ทำให้มีประจุไฟฟ้าขึ้นมาอีกครั้ง



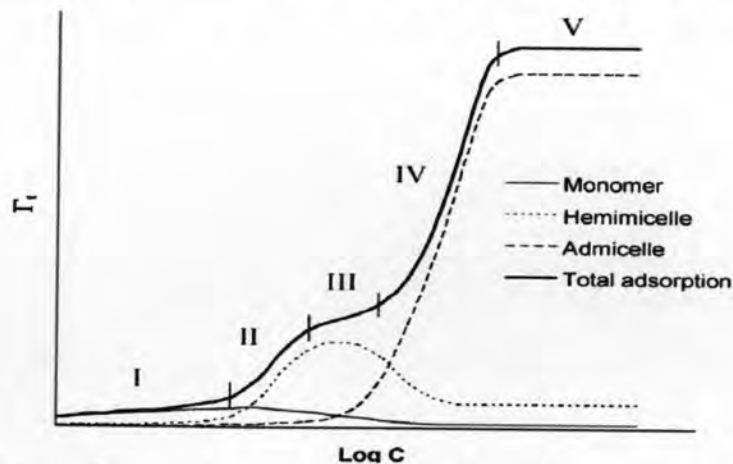
รูปที่ 2.15 สารลดแรงตึงผิวที่เกาะบนเส้นใยในรูปเฮมิไมเซลล์และแอดไมเซลล์ (Alila et al., 2005)

ช่วงที่ 5 ช่วงนี้สารลดแรงตึงผิวรวมตัวอยู่ในรูปแอดไมเซลล์จนอิ่มตัวทำให้สารลดแรงตึงผิวตัวที่เหลือฟุ้งตัวอยู่ในน้ำในรูปไมเซลล์อิสระ (Free micelle)



รูปที่ 2.16 สารลดแรงตึงผิวที่เกาะบนเส้นใยในรูปแอดไมเซลล์ (Alila et al., 2005)

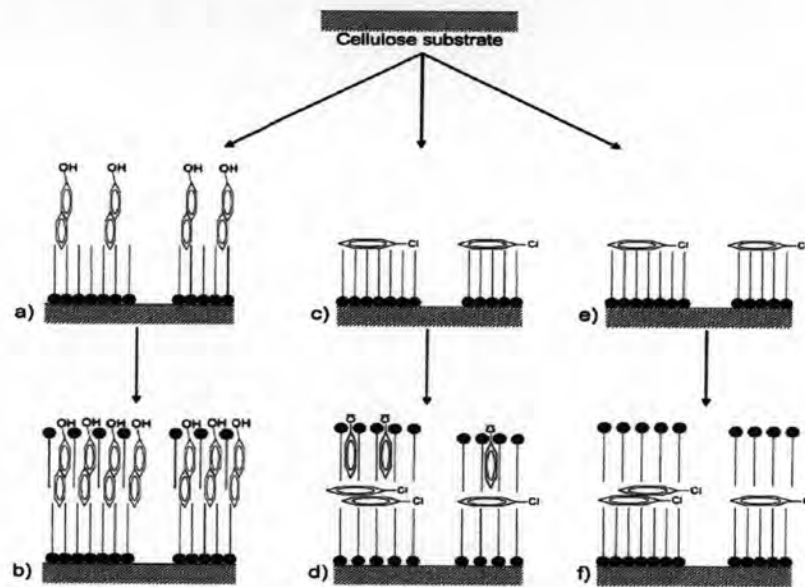
การดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนเส้นใยเซลลูโลสทั้ง 5 ช่วงแสดงเป็นกราฟ ได้ดังนี้ จากกราฟในช่วงที่ 5 เห็นได้ว่ากราฟเริ่มขนานกับแกน x คือสารลดแรงตึงผิวไม่สามารถเกาะบนเส้นใยเซลลูโลสได้แล้ว จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวที่เหลืออยู่ในสารละลายรวมตัวกันอยู่ในรูปไมเซลล์อิสระ หากใส่สารลดแรงตึงผิวมากเกินไปจะทำให้สารอินทรีย์ที่เราต้องการกำจัดเข้าไปอยู่ในไมเซลล์ นั่นหมายถึงการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากแหล่งน้ำจะสูญเปล่าทันที



รูปที่ 2.17 ไอโซเทอมของสารลดแรงตึงผิวบนเส้นใยเซลลูโลส (Alila et al., 2005)

## 2.8 กลไกการดูดซับสารอินทรีย์บนเส้นใยเซลลูโลสที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว

ส่วนการดูดซับสารอินทรีย์บนเส้นใยเซลลูโลสที่ปรับสภาพแล้วมีรูปแบบในการดูดซับได้หลายรูปแบบ โดยที่สารอินทรีย์จะเกาะกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวในรูปแบบต่าง ๆ กัน (รูป a c และ e) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจะทำให้สารลดแรงตึงผิวเกิดการรวมตัวกันเป็นไบเลเยอร์ (Bilayer) ดังรูป



รูปที่ 2.18 รูปแบบการดูดซับสารอินทรีย์บนเส้นใยเซลลูโลสที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิว

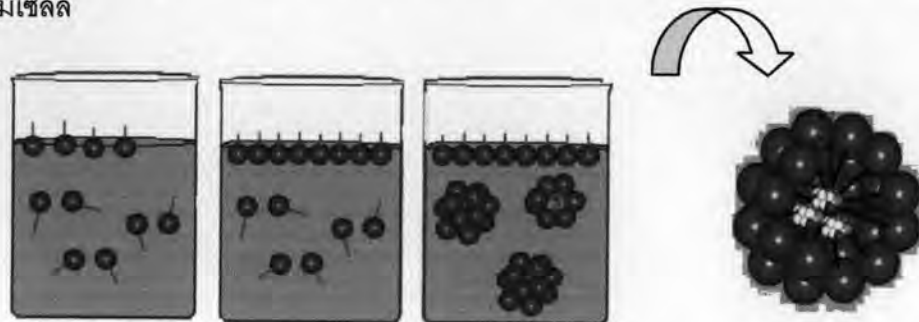
(Alila et al., 2007)

## 2.9 การชะออก (Desorption)

เมื่อมีการศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับย่อมต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับการชะออกควบคู่กันไปด้วย ในปัจจุบันการชะเอาสารลดแรงตึงผิวออกจากตัวกลางนั้นเป็นไปได้ยาก ซึ่งเป็นเพราะการเกาะกันของสารลดแรงตึงผิวและตัวกลางใช้พันธะเคมีในการจับกัน ดังนั้นในส่วนของการศึกษาการชะออกของสารลดแรงตึงผิวบนตัวกลางยังต้องทำการศึกษาต่อไป

สำหรับการชะออกของสารอินทรีย์บนตัวกลางที่ปรับสภาพนั้นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวเป็นตัวชะออก โดยจะต้องใส่สารลดแรงตึงผิวไปให้เท่ากับค่าความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ด้วย ซึ่งค่าความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ คือค่าความเข้มข้นที่ทำให้ในสารละลายอิมิตัวด้วยไมเซลล์ ซึ่งไม่เกิดจากการที่สารลดแรงตึงผิวอิมิตัวในน้ำ จนทำให้สารลดแรงตึงผิวที่ใส่

ลงไปในนั้นเกิดการรวมตัวกันเองโดยนำส่วนหัวที่ชอบน้ำออกมาข้างนอกและหันส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้ามาไว้ข้างในเกิดเป็นรูปทรงกลม ซึ่งเรียกรูปทรงกลมที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารลดแรงตึงผิวว่า ไมเซลล์

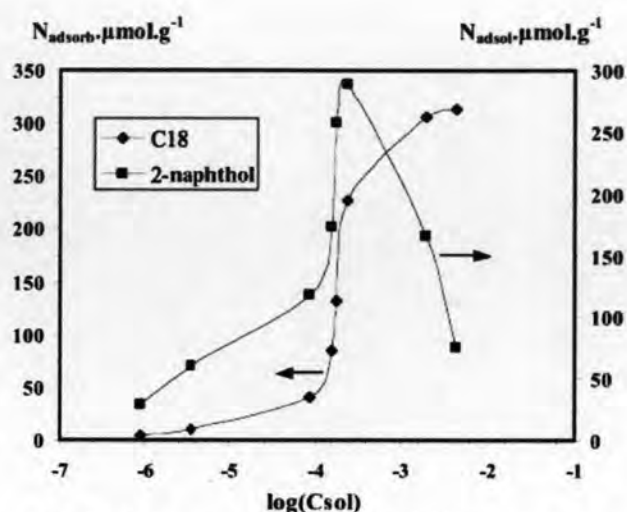


รูปที่ 2.19 การรวมตัวกันของสารลดแรงตึงผิวจนเกิดไมเซลล์ (Behan, 1999)

จากรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าด้านในของไมเซลล์จะมีความไม่ชอบน้ำสูงซึ่งความพิเศษนี้ทำให้สามารถเก็บกักโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ไม่ชอบน้ำเช่นกันได้ดี นั่นคือจะทำให้สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนรวมไปถึงสารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำสามารถเข้าไปอยู่ในไมเซลล์ ซึ่งจะช่วยให้สารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำเหล่านี้อยู่ในไมเซลล์ได้อย่างเสถียรกว่าอยู่ในน้ำมาก

ดังนั้นหากเราใส่สารลดแรงตึงผิวไปมากเกินไปกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์จนเกิดไมเซลล์ในสารละลายขึ้น จะทำให้สารอินทรีย์ที่ไม่ชอบน้ำหลุดออกจากตัวกลาง เข้าไปอยู่ในไมเซลล์ เพราะว่าไมเซลล์ทำให้โมเลกุลของตัวเองมีความเสถียรมากกว่าอยู่บนตัวกลางมาก ถ้าหากมีไมเซลล์ในสารละลายมากก็จะเกิดการชะออกมากขึ้นเท่านั้น

จากรูป 2.20 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (C18) จนทำให้เกิด ความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์สังเกตได้จากกราฟเส้น C18 ที่เส้นกราฟเริ่มจะขนานกับแกน x นั้นหมายถึง สารลดแรงตึงผิวมาเกาะจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวกลางแล้ว จนทำให้สารลดแรงตึงผิวที่ใส่เพิ่มขึ้นมาเกิดการรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ ทำให้ชะพาเอาสารอินทรีย์ออกจากตัวกลางได้สังเกตได้จากกราฟของ 2-naphthal ที่ตอนแรกมีอัตราการดูดซับบนเส้นใยสูงขึ้นเรื่อย ๆ หลังจากนั้นเส้นกราฟเริ่มตกลงมาอย่างรวดเร็ว นั้นหมายถึงสารอินทรีย์ได้ถูกชะออกจากตัวกลางไปอยู่ในไมเซลล์ที่อยู่ในสารละลายแล้ว จะเห็นว่าในการปรับสภาพสารลดแรงตึงผิวบนเส้นใย จะต้องทำการศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวให้ดีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับและการชะออกได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 2.20 การชะออก (Desorption) (Aloulou et al., 2004)

นอกจากรูป 2.20 สามารถบอกได้ว่าควรใช้สารลดแรงตึงผิวความเข้มข้นเท่าไรในการดูดซับหรือใช้ในการชะสารปนเปื้อนออกจากตัวกลางแล้ว รูปนี้ยังสามารถบอกได้ว่าสารอินทรีย์จะมาเกาะแค่ส่วนของพื้นที่ผิวของตัวกลางเท่านั้น เพราะทำให้สารอินทรีย์สามารถหลุดออกมาจากตัวกลางไปอยู่ในไมเซลล์ได้ ดังนั้นสามารถยืนยันได้ว่าการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเป็นกระบวนการดูดซับไม่ใช่การดูดซึมหรือ Absorption

## 2.10 ขั้นตอนการดำเนินงานในกระบวนการดูดซับ

### 2.10.1 การเตรียมตัวกลาง

สำหรับการเตรียมตัวกลางนั้นแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนใหญ่ คือ การทำความสะอาดเส้นใยและการเพิ่มประจุลบให้เส้นใย

#### 2.10.1.1 การทำความสะอาดเส้นใย

ในขั้นนี้ถือเป็นการทำความสะอาดเส้นใยดิบที่นำมาจากแหล่งผลิต หากเส้นใย ที่นำมาใช้เป็นเส้นใยสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะสามารถนำมาใช้ในการดูดซับได้เลย (Aloulou et al., 2004) แต่หากเป็นเส้นใยธรรมชาติ จะต้องมีการทำความสะอาดก่อนเสมอเพราะยังมีฝุ่นและสิ่งสกปรกตกค้างอยู่ สำหรับการทำความสะอาดเส้นใย สามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ การทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละอองออกไปจากเส้นใยเท่านั้น (Lim et al., 2007) กับอีกกลุ่มหนึ่งที่ทำความสะอาดและฟอกเส้นใยทำเพื่อกำจัดเส้นใยที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกไปด้วย (Fras-Zemljic et al., 2008; Frasz-Zemljic et al., 2006)

### 1) การล้างเส้นใย

วิธีการทำความสะอาดเส้นใยเพื่อกำจัดฝุ่นละออง คือการนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำกลั่น แยกเส้นใยออกจากน้ำล้างและอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

### 2) การทำความสะอาดและฟอกเส้นใย

วิธีการทำความสะอาดและฟอกเส้นใยเริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดเส้นใยด้วยการล้างน้ำกลั่น จากนั้นจึงทำการฟอกเส้นใยตามขั้นตอนดังนี้

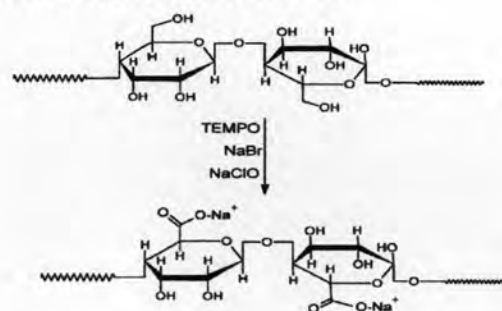
1. ต้มใน NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที เพื่อกำจัดเส้นใยที่ไม่ใช่เซลลูโลสออกไป
2. ฟอกสีเส้นใยด้วย  $H_2O_2$  อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส พีเอช 11 เป็นเวลา 30 นาที
3. ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกว่าสภาพการนำไฟฟ้าของน้ำน้อยกว่า 5 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ทิ้งให้แห้ง

#### 2.10.1.2 การเพิ่มประจุลบให้เส้นใย

การเพิ่มประจุลบให้แก่เส้นใยเพื่อให้สารลดแรงตึงผิวประจุบวกสามารถเกาะบนเส้นใยได้เพิ่มขึ้น ซึ่งวิธีการเพิ่มประจุลบให้แก่เส้นใยนั้นมีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างกันโดยจะขอกกล่าวถึง 2 วิธีดังนี้ ดังนี้

#### 1) การเพิ่มประจุลบให้เส้นใยด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

การเพิ่มประจุลบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นการเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลิก ( $-COOH$ ) ให้กับเส้นใย (Alila et al., 2007; Alila et al., 2005; Aloulou et al., 2004) ซึ่งวิธีการนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่าย และใช้เวลาไม่นาน



รูปที่ 2.21 ปฏิกิริยาออกซิเดชันของเส้นใยเซลลูโลส

(Alila et al., 2005)

สารเคมีที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ TEMPO (2, 2, 6, 6-tetramethyl-1-piperidinyloxy radical) NaBr และ 12 % NaOCl ซึ่งวิธีการเพิ่มประจุลบให้เส้นใยเป็นดังนี้

1 ใส่เส้นใยเซลลูโลส (10 ก.) TEMPO (25 มก.) และ NaBr (250 มก.) ในน้ำกลั่น (500 มล.)

2. ปรับ pH ให้เป็น 10 ด้วย 0.5 โมล/ลิตร NaOH
3. ใส่ 12 % NaOCl
4. เขย่า 2 ชั่วโมง (ควบคุม pH ให้เป็น 10 ตลอดเวลา)
5. หยุดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยเอทานอล 100 มล.
6. นำเส้นใยไปกรองเพื่อเอาน้ำออก
7. ล้างด้วย NaOH 1 โมล/ลิตร เพื่อกำจัดลิกนิน 2 ครั้ง
8. ล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เข้าใกล้ 7

## 2) การเพิ่มประจุลบให้เส้นใยด้วยการรีฟลักซ์

การเพิ่มประจุลบให้เส้นใยด้วยการรีฟลักซ์เป็นวิธีการที่ยุ่งยากใช้เวลานาน แต่มีงานวิจัยพบว่า วิธีนี้ทำให้เส้นใยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับไม่ได้ลดลงไปเลย (Boufi et al., 2006) ซึ่งวิธีการเพิ่มประจุลบด้วยการรีฟลักซ์เป็นดังนี้

1. แช่เส้นใยในน้ำเป็นเวลา 30 นาที
2. ล้างด้วยเอทานอล
3. แช่ใน Toluene/Triethylamine (TEA) (80/20 w/w)
4. ใส่ในขวดสามคอ (A Threenecked Flask) ด้วยระบบ Dean Stark System
5. รีฟลักซ์จนน้ำที่อยู่ในเส้นใยออกจนหมดด้วย Azeotropic Distillation
6. ใส่กรด Acid Anhydride และ Catalyst (DMAP, DABCO, Imidazol) แล้วเขย่า
7. รีฟลักซ์และทำให้แห้งเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
8. ทิ้งให้อุณหภูมิลดลงแล้วทำให้บริสุทธิ์ด้วย Soxhlet Extraction สกัดด้วย THF/Ethanol (50/50 vol.) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

9. ทำให้แห้งด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

### 2.10.2 การปรับสภาพเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

สารลดแรงตึงผิวประจุบวกที่แต่ละงานวิจัยนำมาใช้นั้นมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันงานวิจัยทั้งหลายสนใจศึกษาอิทธิพลของความยาวของส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic Tail) ของสารลดแรงตึงผิวประจุบวก จึงขอจำแนกสารลดแรงตึงผิวประจุบวกโดยใช้จำนวนคาร์บอนอะตอมของส่วนหางหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำเป็นเกณฑ์ ดังนี้

1. C18 เช่น Octadecyl Trimethylammonium Bromide
2. C16 เช่น Hexadecyl Trimethylammonium Bromide Hexadecyl

Pyridinium Chloride

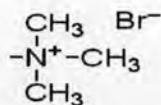
3. C14 เช่น Tetradecyl Trimethylammonium Bromide
4. C12 เช่น Dodecyl Trimethylammonium Bromide Dodecyl pyridinium

chloride

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของจำนวนคาร์บอนอะตอม งานวิจัยทั้งหลายสรุปว่า ยังมีคาร์บอนอะตอมมากเท่าไรก็จะสามารถทำให้เส้นใยดูดซับสารอินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้น

สารลดแรงตึงผิวประจุบวกไม่ได้มีความแตกต่างกันที่จำนวนคาร์บอนอะตอมเท่านั้น แต่ยังมีความต่างกันของหมู่ฟังก์ชันของส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic Head) ของโมเลกุลอีกด้วย ซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างกันที่นิยมนำมาใช้แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ

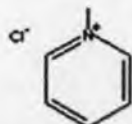
1. สารลดแรงตึงผิวที่มีไตรเมทิลแอมโมเนียมเป็นหมู่ฟังก์ชัน เช่น Octadecyl Trimethylammonium Bromide (C18) Hexadecyl Trimethylammonium Bromide (C16) Tetradecyl Trimethylammonium Bromide (C14) Dodecyl Trimethylammonium Bromide (C12)



รูปที่ 2.22 สารลดแรงตึงผิวประจุบวกที่ไตรเมทิลแอมโมเนียมเป็นหมู่ฟังก์ชัน

(Sigma-Aldrich, 2009)

2. สารลดแรงตึงผิวที่มีไพริดีเนียมเป็นหมู่ฟังก์ชัน เช่น Hexadecyl Pyridinium Chloride (C16) Dodecyl Pyridinium Chloride (C12)



รูปที่ 2.23 สารลดแรงตึงผิวประจุบวกที่มีไพริดีเนียมเป็นหมู่ฟังก์ชัน  
(Sigma-Aldrich, 2009)

### 2.10.2.1 วิธีการเตรียมสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

การเตรียมสารลดแรงตึงผิวประจุบวกมักเตรียมเป็น Stock Solution ด้วยการนำสารลดแรงตึงผิวประจุบวกมาละลายให้มากที่สุด จนถึงค่าความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, cmc) โดยละลายสารลดแรงตึงผิวในน้ำกลั่นและเขย่าให้เข้ากัน

### 2.10.2.2 วิธีการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

วิธีการปรับสภาพเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวกเป็นดังนี้

1. ใส่สารลดแรงตึงผิวใน 1 % สารละลายเส้นใยเซลลูโลส
2. ควบคุมสภาวะให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช อยู่ในช่วง 8 - 8.5
3. เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง.
4. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
5. หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวประจุบวกจากส่วนใสด้านบน (Supernatant) ด้วยเทคนิค Potentiometric Titration

### 2.10.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ใช้มักเป็นสารประกอบที่มีจำนวนวงเบนซีนน้อย เพราะสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำ จึงละลายน้ำได้ง่ายทำให้การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สะดวกยิ่งขึ้น

สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ แนฟทาลีน ฟีนานทรีน ในการละลายสารประกอบโพลีไซคลิก



อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จะละลายด้วยเมทานอล ความเข้มข้นที่ได้จากการเตรียมสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้มักมีความเข้มข้นต่ำในหน่วยไมโครกรัมต่อลิตร หรือนาโนกรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการเขย่ามักใช้เวลาประมาณ 3 วัน (Khan et al., 2007; Qu et al., 2007) ที่อุณหภูมิห้อง

วิธีการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์เป็นดังนี้

1. นำสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Dry PAHs) ละลายในเมทานอล ความคุมค่าพีเอชให้เท่ากับ 7 สาเหตุที่ต้องควบคุมให้ค่าพีเอชเป็นกลางเพราะช่วงพีเอชเป็นกลาง เป็นช่วงที่ทำให้ความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีและง่ายต่อการเตรียมสารละลายหรือการปรับพีเอช

2. นำสารละลายข้างต้นละลายลงในน้ำที่ปราศจากคลอรีน (Dechlorinated Tap Water) เขย่าให้เข้ากันประมาณ 2 - 3 วัน

## 2.10.4 การศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวและสารอินทรีย์บนเส้นใย

### 2.10.4.1 การศึกษาการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวบนเส้นใย

การศึกษานี้เพื่อเลือกสารลดแรงตึงผิวที่สามารถดูดซับบนเส้นใยได้ดีหรือเพื่อวิเคราะห์ว่าสารลดแรงตึงผิวที่เลือกนั้นมีความสามารถในการเกาะบนเส้นใยได้ดีมากเพียงใด

ในการศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใส่ลงไปมักมีความเข้มข้นต่ำในหน่วยมิลลิโมล เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีค่าความเข้มข้นวิกฤติของไมเซลล์ (Critical Micelle Concentration, cmc) ในหน่วยมิลลิโมล ดังนั้นการศึกษาการดูดซับสารลดแรงตึงผิวจึงใช้ความเข้มข้นในหน่วยมิลลิโมลหรือน้อยกว่านั้น เช่น ใส่สารลดแรงตึงผิวประมาณ  $10^{-5}$  -  $8 \times 10^{-3}$  โมลต่อลิตร (Alila et al., 2005) เป็นต้น ส่วนอุณหภูมิ ค่าพีเอชและเวลาที่ใช้ในการเขย่ามักจะใช้ค่าเดียวกัน คืออุณหภูมิที่ใช้เป็นอุณหภูมิห้อง ค่าพีเอชอยู่ระหว่าง 8 - 8.5 เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และหาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในน้ำได้ด้วยเทคนิค Potentiometric Titration

ในการวิเคราะห์การดูดซับสารลดแรงตึงผิวนอกจากจะศึกษาไอโซเทอมของสารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิด ยังสนใจเวลาที่สารลดแรงตึงผิวเกาะบนเส้นใยจนเกิดสมดุล ค่าศักย์ความต่างระหว่างอนุภาค (Zeta Potential) เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าบนเส้นใยตั้งแต่ก่อนใส่สารลดแรงตึงผิวจนกระทั่งเส้นใยอิ่มตัวด้วยสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น

#### 2.10.4.2 การศึกษาการดูดซับของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนบนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก

สำหรับการศึกษาการดูดซับในหัวข้อนี้มีวิธีการวิเคราะห์การดูดซับของสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนบนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวกดังนี้ (Aloulou et al., 2004)

1. ใส่สารลดแรงตึงผิวลงใน 1 % // โดยน้ำหนักของสารละลายเส้นใยนุ่น เขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
2. ใส่สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เขย่าเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
3. บั่นเหรียญที่ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที
  - 3.1 เส้นใย หาปริมาณสารอินทรีย์ที่เกาะอยู่บนเส้นใยด้วยการสกัดด้วยเอทานอล วัดด้วยเทคนิค UV Spectroscopy
  - 3.2 ส่วนใสด้านบน หาปริมาณสารลดแรงตึงผิวด้วยเทคนิค Potentiometric Titration

การวิเคราะห์การดูดซับบนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวกนั้น ยังไม่มีงานวิจัยใดสนใจทำการดูดซับสารประกอบโมเลกุลใหญ่ ๆ สารอินทรีย์ที่ใช้วัดจะเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก สารประกอบอะโรมาติกจะใช้สารประกอบที่มีจำนวนวงเบนซีนเพียงสองวงเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงเบนซีนมากกว่าสองวงนั้น ยังไม่มีงานวิจัยใดทำการวิจัยมาก่อนว่าสารอินทรีย์และสารประกอบอะโรมาติกที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นส่งผลอย่างไร ต่อประสิทธิภาพการดูดซับบนเส้นใยที่ปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวก ซึ่งยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะนำสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ มาทำการศึกษาต่อไป

จากข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนี้ทำให้พบว่า การนำเส้นใยเซลลูโลสมาปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวประจุบวกสามารถดูดซับสารอินทรีย์ที่มีขั้วต่ำ ๆ ได้ดี ดังนั้นจึงทำให้งานวิจัยนี้สนใจที่จะนำเส้นใยนุ่น ซึ่งเป็นเส้นใยธรรมชาติมาเป็นตัวกลางในกระบวนการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำ เพราะเส้นใยนุ่นมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักและในประเทศไทยสามารถพบเส้นใยนุ่นได้ทั่วทุกภาค อีกทั้งยังมีปริมาณมาก ไม่มีปัญหาในเรื่องของการขาดแคลนเส้นใยและมีราคาไม่แพง ถือว่าเป็นตัวกลางที่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับได้เมื่อเทียบกับตัวกลางชนิดอื่น ๆ

ซึ่งบางชนิดต้องมีการสังเคราะห์หรือการเตรียมที่ยุ่งยาก เสียเวลาและค่าใช้จ่าย ด้วยเหตุที่เส้นใยนั้นมีราคาไม่แพง หากได้ง่ายนั้น จึงไม่จำเป็นจะต้องนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้งเพื่อให้ต้นทุนสามารถนำไปกำจัดได้เลย

ในการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำ งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการกำจัดสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ โดยทำการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้และง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ได้ว่าตัวแปรใดบ้างที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์กลุ่มนี้ ซึ่งสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมีเป็นจำนวนมาก แต่ในการวิจัยนี้ศึกษาสารปนเปื้อนกลุ่มนี้ 2 ชนิด ได้แก่ ฟลูออรีนและพีแนทรีน เพราะทั้งสองชนิดนี้เป็นหนึ่งในสารปนเปื้อนที่ก่อให้เกิดมลพิษที่ทาง US Environmental Protection Agency (EPA) ได้ประกาศไว้และเมื่อดูจากค่าการละลายพบว่า สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าการละลายสูง รองลงมาจากแนฟธาลินและเอซิลแนฟธินที่มีค่าการละลายสูง แต่ก็มีค่าการระเหยกลายเป็นไอสูงเช่นกัน จึงทำให้การตกค้างของสารสองตัวนี้เทียบกับฟลูออรีนและพีแนทรีนที่มีค่าการละลายสูงและไม่ระเหย หรืออาจจะระเหยได้แต่ถือว่าน้อยและเมื่อมองในแง่การปนเปื้อนและการสะสมอยู่ในเซลล์สิ่งมีชีวิตในน้ำนั้น ถ้าหากโมเลกุลที่มีค่าการละลายน้ำสูงจะสามารถแพร่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และซึมเข้าผิวผนังสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ง่ายกว่าโมเลกุลที่มีค่าการละลายต่ำ ๆ และเมื่อเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตในน้ำง่าย ก็จะสามารถเกิดการสะสมในห่วงโซ่อาหารและเกิดการสะสมในสิ่งมีชีวิตสายพันธุ์อื่น ๆ ตามไปด้วย โดยที่พีแนทรีนจะเป็นสารปนเปื้อนหลักที่มากับควันจาก ท่อไอเสีย ควันที่เกิดจากการเผาไหม้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั้งหลายรวมไปถึงในควันบุหรี่

ซึ่งจากสภาพสังคมปัจจุบันมีการใช้ยานพาหนะ การก่อตั้งโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก จึงพบพีแนทรีนปนเปื้อนอยู่ในอากาศและในน้ำฝนเป็นจำนวนมาก เมื่อเทียบกับสารปนเปื้อนกลุ่มเดียวกัน จากนั้นก็จะถูกชะมารวมอยู่ในแหล่งน้ำในความเข้มข้นที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ และผลกระทบของพีแนทรีนต่อสิ่งมีชีวิตนั้น โดยปกติสารปนเปื้อนในกลุ่มนี้มักเกิดพิษแบบเรื้อรัง แต่สำหรับพีแนทรีน พบว่าหากสะสมในปริมาณมากสามารถก่อให้เกิดพิษแบบเฉียบพลัน โดยอาจมีผลต่อสิ่งมีชีวิตภายใน 4 - 8 สัปดาห์ได้ ส่วนฟลูออรีนมักใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมสีย้อม เมื่อมองดูการประกอบอุตสาหกรรมนี้อาจจะพบว่าไม่มากเมื่อเทียบกับอุตสาหกรรมประเภทอื่น ๆ ในประเทศไทย แต่พบว่าการปนเปื้อนของฟลูออรีนที่ออกสู่แหล่งน้ำนั้น ก่อให้เกิดพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้หลากหลายชนิด ส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต

หลายสายพันธุ์เมื่อเทียบกับสารปนเปื้อนในกลุ่มเดียวกัน สำหรับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนนอกเหนือจากนี้ ยังส่งผลทำให้เกิดพิษในสิ่งมีชีวิตเช่นกัน เพียงแต่เมื่อคำนึงถึงค่าความเข้มข้นของสารประกอบที่พบมากในปัจจุบันและผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต จัดว่าฟลูออรีนและฟิแนนทรีนอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและ ควรได้รับการกำจัดออกจากแหล่งน้ำโดยเร็วที่สุด

สารลดแรงตึงผิวที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการดูดซับนั้นเลือกใช้โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Dodecyltrimethylammonium bromide, DTAB) และโดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์ (Dodecylpyridinium chloride, DPC) เพื่อต้องการทราบถึงปัจจัยของหมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหรือไม่ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดมีความต่างกันตรงที่โดเดซิลไพริดีเนียมคลอไรด์มีวงเบนซีนเป็นส่วนประกอบ แต่โดเดซิลไตรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ไม่มี วงเบนซีนเป็นองค์ประกอบ ความแตกต่างนี้จะทำให้สารลดแรงตึงผิวที่มีวงเบนซีนเป็นองค์ประกอบมีความเป็นขั้วต่ำ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อความสามารถในการไปเกาะบนพื้นผิวของตัวกลางได้ และสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดนี้มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากันคือ 16 อะตอม สาเหตุที่เลือกสารลดแรงตึงผิวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากัน เป็นเพราะมีงานวิจัยได้สรุป ออกมาแล้วว่าสารลดแรงตึงผิวที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมสูง ๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ จึงเลือกสารลดแรงตึงผิวที่มีคาร์บอนอะตอมสูง ๆ เพื่อให้ความสามารถในการดูดซับเกิดได้ดียิ่งขึ้น ประโยชน์จากการศึกษาเรื่องอิทธิพลของหมู่ฟังก์ชันนี้จะเกิดประโยชน์ในการเลือกสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้สามารถกำจัดสารปนเปื้อนน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด