

การบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนเบนซีนโดยการกรองชีวภาพ
ด้วยตัวกลางกรองเศษวัสดุเกษตรกรรม

**Biofiltration of Benzene Contaminated Air with
Agricultural By- Product Filter Media**

คำนำ

หลายปีที่ผ่านมาการพัฒนาแหล่งอุตสาหกรรมต่างๆภายในประเทศไทยเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเพื่อตอบสนองต่อความต้องการภายในประเทศและเพื่อให้ระบบเศรษฐกิจโดยรวมเจริญและมั่นคงขึ้น แต่จากการขยายตัวทางอุตสาหกรรมนี้ก็เกิดผลเสียตามมาเช่น ปัญหามลพิษจากแหล่งอุตสาหกรรม สารมลพิษต่างๆที่ปล่อยจากแหล่งอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็น ไอของสารพิษ ฝุ่นละออง สารเคมี ขยะ และของเสียอันตราย สิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางน้ำ ทางอากาศ และที่สำคัญส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์

ปัญหามลพิษทางอากาศเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากแหล่งอุตสาหกรรม มลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นได้แก่ ฝุ่นละออง ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และกลิ่นเป็นต้น สารอินทรีย์ระเหย(Volatile Organic Compounds: VOCs) เป็นสารมลพิษที่สำคัญอีกประเภทหนึ่งที่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ ณ ปัจจุบันนี้ ปัญหาเนื่องจากการปล่อยสารอินทรีย์ระเหยออกสู่บรรยากาศได้สร้างความวิตกกังวลต่อมนุษยชาติ เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยนั้นมีส่วนประกอบหลักสำคัญคือ ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbons) โดยทาง United Stage Environmental Protection Agency (USEPA) ได้มีการจัดเรียงลำดับให้ความสำคัญต่อสารอินทรีย์ระเหยประมาณ 114 ชนิด ให้เป็นสารอินทรีย์ระเหยที่มีอันตราย เช่น เบนซีน, Toluene และ Dichloromethane เป็นต้น มลพิษเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบในทางตรงต่อสุขภาพ เช่น เบนซีน ซึ่งได้มีการพิสูจน์แล้วว่า เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบในทางอ้อมคือ ทำให้เกิดกลุ่มหมอกที่มีองค์ประกอบของสารเคมี(Photochemical Smog) โดยกลุ่มหมอกนี้เกิดขึ้นได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารอินทรีย์ เช่นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และไนโตรเจนออกไซด์ โดยมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ เช่น ทำให้ดวงตาเกิดอาการระคายเคือง, ก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ, สร้างความเสียหายให้กับการทำเกษตรกรรม, ลดความ

สามารถในการมองเห็น และก่อให้เกิดผลกระทบต่อวัสดุและสิ่งก่อสร้างต่างๆ โดยทั่วไปสารระเหยอินทรีย์ที่มีการปล่อยออกสู่บรรยากาศนั้นมีแหล่งที่มาจาก รถยนต์ การระเหยของตัวทำละลาย, อุตสาหกรรมน้ำมัน, การเผาไหม้ และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

เทคนิคต่างๆ ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนในอากาศนั้นได้แก่ การเผาโดยตรงในเตาเผา, การควบแน่น, การดูดซับ และการดูดซึม เป็นต้น โดยเทคนิคเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกันในส่วนที่เป็นวิธีการถ่ายโอนสารอินทรีย์ระเหยจากเฟสที่เป็นก๊าซไปสู่เฟสอื่น เช่น ของเหลวของแข็ง เป็นต้น ทำให้เกิดมลภาวะในรูปแบบที่ 2 ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดตัวกลางที่ใช้ในการโยกย้ายถ่ายเทเฟสของสารอินทรีย์ระเหยต่อไป ทำให้ต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงขึ้น ในปัจจุบันเทคนิคการบำบัดมลพิษทางอากาศด้วยวิธีการกรองชีวภาพ (Biofiltration) กำลังเป็นที่สนใจและเป็นทางเลือกใหม่ที่มีความสำคัญในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยที่ปนเปื้อนในอากาศ เนื่องจากเทคนิคนี้ ไม่จำเป็นต้องมีการบำบัดตัวกลางที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารอินทรีย์ระเหย ดังเช่นเทคนิคอื่น ไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีมาช่วยในการบำบัดนอกจากการเติมสารอาหารเพิ่มเติมให้แก่จุลินทรีย์ในกรณีที่จำเป็นเท่านั้นจึงส่งผลทำให้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเทคนิคการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยการกรองชีวภาพนี้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่ใหม่ดังนั้นการที่จะทำให้ระบบการบำบัดมีประสิทธิภาพที่ดีนั้นจำเป็นจะต้องมีการศึกษาทดลองเพื่อหาวิธีการควบคุมระบบเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดี นอกจากนี้ควรจะมีการพัฒนาระบบให้ดีขึ้น มีความสามารถในการบำบัดที่หลากหลายและเป็นแนวทางในการออกแบบเพื่อที่จะใช้งานจริง รวมถึงความคุ้มค่าในการลงทุนก่อสร้างด้วย

วัตถุประสงค์

1. หาประสิทธิภาพของการบำบัดเบนซีน (Benzene) ที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยระบบการกรองแบบชีวภาพเมื่อใช้ตัวกลางกรองที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ เปลือกถั่วลิสง และแกลบ

2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีน ที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยระบบการกรองแบบชีวภาพ ที่สภาวะการทดลองต่างๆ โดยติดตามตรวจวัดผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มข้นของเบนซีน ณ จุดที่เข้าระบบ, ระหว่างอยู่ในระบบ และจุดออกจากระบบตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องควบคุมและพารามิเตอร์อื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ ได้แก่ ความเร็วลม ,ค่าความชื้นของอากาศเข้าระบบ, อุณหภูมิ และ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

3. สรุปประสิทธิภาพในการบำบัดเบนซีนปนเปื้อนในอากาศด้วยระบบการกรองแบบชีวภาพที่สภาวะการทดลองต่างกันตามลำดับ ของตัวกลาง 2 ชนิดในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale)

การตรวจเอกสาร

1. ลักษณะทั่วไปของเบนซิน

เบนซิน เป็นสารเคมีที่ไม่มีการผลิตในประเทศไทย ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ปริมาณนำเข้า เบนซิน ระหว่างปีพ.ศ. 2536-2538 มีเพียง 3,191, 10,268 และ 1,268 กิโลกรัม ตามลำดับ ปริมาณนำเข้าได้เพิ่มเป็น 198,938 กิโลกรัมในปี 2539 และเพิ่มขึ้นกว่า 123 เท่าในปี 2540 คือมีปริมาณนำเข้าถึง 24.47 ล้านกิโลกรัม และในปี 2541 ปริมาณนำเข้าได้เพิ่มสูงขึ้นเป็น 48.06 ล้านกิโลกรัม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมของประเทศอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการเบนซิน ปริมาณมากเพื่อใช้ในการผลิตสินค้า ในช่วงเวลาดังกล่าวไทยได้นำเข้าเบนซินจาก 9 ประเทศ เฉพาะปี 2541 ซึ่งมีปริมาณนำเข้ากว่า 48 ล้านกิโลกรัม นั้น ไทยนำเข้าเบนซินเกือบทั้งหมดจาก อินโดนีเซีย สิงคโปร์ และเกาหลี (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

เบนซินเป็นสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยเป็นส่วนประกอบของน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งอาจมีสูงถึง 4 เปอร์เซ็นต์ของการผลิต เบนซินทั่วโลกในแต่ละปีมีปริมาณสูงมากเช่น ในปี พ.ศ. 2524 มีการผลิตถึง 14.8 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2534 เฉพาะประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการผลิตถึง 439,000 ตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) กรรมวิธีการผลิตเบนซินในทางอุตสาหกรรมมีหลายวิธี เช่น ปฏิริยา Catalytic reforming ของน้ำมันปิโตรเลียม การเผาและกลั่นถ่านหิน ปฏิริยา Dealkylation ของสาร Toluene วิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายคือ Catalytic reforming ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ผลิตเบนซินกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในประเทศสหรัฐอเมริกา (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ปฏิริยา Catalytic reforming เป็นกระบวนการเปลี่ยน โครงสร้างของสารประกอบในน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวมีค่าออกเทนต่ำ ให้เป็นสารประกอบไม่อิ่มตัวซึ่งมีค่าออกเทนสูงขึ้น วิธีการคือเผาน้ำมันปิโตรเลียมที่ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 15-70 บรรยากาศ โดยมีตัวเร่งปฏิริยา เช่น $\text{Re/Pt/Al}_2\text{O}_3$ ปฏิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ได้เบนซินคือ ปฏิริยา Dehydrocyclization ของสาร alkane ได้สาร aromatic และปฏิริยาการเปลี่ยนโครงสร้างของ alkylcyclopentane ได้อนุพันธ์ของ cyclohexane ซึ่งจะเกิดปฏิริยา dehydrogenation ต่อ ได้สาร aromatic รวมทั้งเบนซิน ผลของปฏิริยา Catalytic reforming นี้ทำให้ได้น้ำมันที่มีค่า octane สูงถึง 80-90 และยังใช้ผลิต เบนซิน, toluene และ xylene ในทางอุตสาหกรรมอีกด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ในปัจจุบันประโยชน์ส่วนใหญ่ของเบนซิน คือ ใช้ในการผลิตสารเคมีหลายชนิด เช่น styrene, phenol, cyclohexane, aniline มีเพียงบางส่วนที่ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตสี การทำหนังเทียม ผลิตภัณฑ์จากยาง สารทำความสะอาด และใช้เป็นตัวทำละลายในห้องปฏิบัติการ อย่างไรก็ตามการใช้เบนซิน ในห้องปฏิบัติการมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเบนซินเป็นสารก่อมะเร็งในคน

1.1 เส้นทางที่เบนซินไปสู่สิ่งแวดล้อม

แหล่งที่ปล่อยเบนซินสู่สิ่งแวดล้อมที่สำคัญได้แก่ไอเสียรถยนต์ การระเหยของน้ำมันขณะเติมน้ำมันรถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เบนซินในกระบวนการผลิต และจากควันบุหรี่ ในน้ำมันรถยนต์มี เบนซิน เป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย เช่น น้ำมันในสหรัฐอเมริกามี เบนซิน อยู่ 0.2-2 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันในยุโรปมี 5 – 16 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก เบนซิน ที่อยู่ในน้ำมันถูกเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ในเครื่องยนต์ ดังนั้น เบนซิน ที่ไม่ถูกเผาไหม้จึงถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมพร้อมไอเสียจากรถยนต์ Dasch and Williams (1991) ได้รวบรวมข้อมูลการปล่อยเบนซินในท่อไอเสียจากรถยนต์ชนิดต่างๆ พบว่ารถยนต์รุ่นเก่าที่ไม่มี catalytic converter มีอัตราเฉลี่ยของการปล่อยเบนซินออกมาในไอเสียเท่ากับ 117.6 มิลลิกรัม/ระยะทางวิ่ง 1 กิโลเมตร ในขณะที่รถยนต์รุ่นใหม่ซึ่งติดตั้ง catalytic converter มีอัตราเฉลี่ยของการปล่อยเบนซินเท่ากับ 24.2 มิลลิกรัม/ ระยะทางวิ่ง 1 กิโลเมตร จากปริมาณการใช้น้ำมันที่เพิ่มขึ้นทุกปี จึงทำให้ไอเสียจากรถยนต์เป็นแหล่งที่ปล่อยเบนซินสู่สิ่งแวดล้อมมากที่สุด (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ควันบุหรี่ยังเป็นแหล่งที่ปล่อยเบนซินสู่สิ่งแวดล้อมที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถทำให้เกิดการปนเปื้อนของ เบนซิน และสาร Hydrocarbon ในอากาศของสถานที่ทำงานและภายในอาคารต่างๆ ได้ Lofroth *et al.* (1989) แสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้บุหรี่ 1 มวน มี เบนซิน ถูกปล่อยออกมาถึง 0.5 มิลลิกรัม (ข้อมูลที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง คือ การเผาไหม้บุหรี่ 1 มวน มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ถูกปล่อยออกมาถึง 67 มิลลิกรัม) ประชาชนได้รับเบนซินจากการหายใจเอาอากาศที่ปนเปื้อนด้วยเบนซิน โดยเฉพาะบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น บริเวณรอบสถานีเติมน้ำมันรถยนต์ โรงงานที่ใช้เบนซินในกระบวนการผลิตและจากควันบุหรี่ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

1.2 ความเข้มข้นของเบนซีนในสิ่งแวดล้อม

1.2.1 การสูญเสียและการคงสภาพ (Loss and Persistence)

การแตกสลาย (degradation) ของเบนซีนในอากาศเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยแสง (photo oxidation) กับอนุมูลอิสระ hydroxyl, alkoxy และ peroxy ทั้งนี้ปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ hydroxyl มีความสำคัญที่สุด การแตกสลายทางชีวภาพของ เบนซีน ในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และดิน เกิดขึ้นได้ทั้งใช้ออกซิเจน (aerobic) และไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic) ค่าครึ่งชีวิตของเบนซีนในสิ่งแวดล้อมแสดงในตารางที่ 1

1.2.2 ความเข้มข้น (Concentration)

เนื่องจากเบนซีนเป็นสารเคมีที่มีการใช้ในปริมาณสูงในทางอุตสาหกรรมและเป็นส่วนประกอบในน้ำมันรถยนต์ จึงทำให้มีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ความเข้มข้นของ เบนซีนในอากาศในประเทศต่างๆมีความแตกต่างกันอย่างมาก เช่น ในกรุง London ตรวจพบ เบนซีน สูงถึง 85 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร ในขณะที่เมืองต่างๆในสหรัฐอเมริกาและแคนาดา มีเบนซีนปนเปื้อนในบรรยากาศไม่เกิน 20 ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของ เบนซีน ในอากาศในประเทศต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ในแหล่งน้ำธรรมชาติมีการปนเปื้อนของเบนซีน ในความเข้มข้นที่ต่ำมาก ตัวอย่างเช่น ในแม่น้ำ Brazos มลรัฐ Texas ตรวจพบเบนซีนปนเปื้อน 0.004 – 0.9 ไมโครกรัม/ลิตร แม่น้ำ Potamac กรุง Washington D.C. มีการปนเปื้อนน้อยกว่า 2 ไมโครกรัม/ลิตร และน้ำใต้ดินในมลรัฐ Nebraska พบการปนเปื้อน 1.6 ไมโครกรัม/ลิตร มีเพียงรายงานของ Colenutt and Thornburn (1980) ที่ตรวจพบเบนซีนในน้ำฝนสูงถึง 87.2 ไมโครกรัม/ลิตร โดยไม่ทราบสาเหตุของการปนเปื้อน (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

1.3 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงของเบนซีนในสิ่งแวดล้อม

1.3.1 การย่อยสลายโดยชีวภาพและการเปลี่ยนรูปโดยชีวภาพ(biodegradation and biotransformation)

เบนซีนในแหล่งน้ำใต้ดินและผิวดินสามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หลายชนิด ทั้งในสภาวะมีออกซิเจน(aerobic)และไม่มีออกซิเจน(anaerobic) ซึ่งการสลายตัวทั้งสองสภาวะให้ผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกันคือ catechol และตามด้วยปฏิกิริยาการแตกสลายของวงแหวนเบนซีน

ปฏิกิริยาการย่อยสลายเบนซีนโดยสิ่งมีชีวิตในน้ำใต้ดินและในแม่น้ำเป็นแบบ first-order มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 28 และ 16 วันตามลำดับ Gibson *et al.* (1968) พบว่าแบคทีเรีย *Pseudomonas putida* ซึ่งแยกได้จากตัวอย่างดินสามารถย่อยสลายเบนซีนโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ catechol ซึ่งเป็นรายงานแรกที่แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียเดี่ยวที่แยกจากดินสามารถย่อยสลายเบนซีนได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

จากการศึกษาโดยวิธี static flash-screening method พบว่า phenol ในน้ำเสียชุมชนที่ความเข้มข้น 5 และ 10 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ถูกย่อยสลายโดยสิ่งมีชีวิตได้หมดภายใน 2 สัปดาห์ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

1.3.2 การย่อยสลายโดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงของ เบนซีน ไม่เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้น troposphere เนื่องจากเบนซีน ไม่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 260 นาโนเมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) ข้อสมมติฐานนี้สนับสนุนโดยการศึกษาของ Korte and Klein (1982) ซึ่งไม่พบการย่อยสลายเบนซีนที่ได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 290 นาโนเมตร เป็นเวลา 6 วันในห้องปฏิบัติการ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

1.3.3 การแตกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis)

ไม่พบรายงานการแตกสลายด้วยน้ำของ เบนซีน

1.3.4 การรวมตัว (Sorption)

เนื่องจากเบนซีนเป็นสารระเหยได้ง่าย ดังนั้นส่วนใหญ่เบนซีนที่หกรดในดินจึงระเหยออกสู่บรรยากาศ มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกดูดซับไว้โดยดิน เบนซีนมีค่า Soil-adsorption coefficient หรือ K_{oc} เท่ากับ 83 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเบนซีนถูกดูดซับในดินเพียงเล็กน้อย การปนเปื้อนของเบนซีนในดินบริเวณใกล้เคียงกับโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตเบนซีน หรือใช้เบนซีน ในกระบวนการผลิตห้ำแห่งในสหรัฐอเมริกา มีค่าระหว่าง < 2 และ 191 ไมโครกรัม/กิโลกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, 2542) Staples *et al.* (1985) รายงานการตรวจวิเคราะห์ดินที่เก็บจากสถานที่ต่างๆ ทั่วสหรัฐอเมริกา รวม 335 แห่ง มีเพียง 9 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นที่ตรวจพบเบนซีน ปนเปื้อนอยู่และค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นที่พบน้อยกว่า 5 ไมโครกรัม/กิโลกรัม

1.3.5 การกลายเป็นไอ (Evaporation)

เบนซีนเป็นสารระเหยได้ง่ายพิจารณาจากค่าความดันไอสูงถึง 100 มิลลิเมตรปรอท ที่ 26.1 องศาเซลเซียส ดังนั้นการปนเปื้อนของเบนซีนในน้ำและดินจึงมีความเข้มข้นที่ต่ำเนื่องจากเบนซีนระเหยสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

1.3.6 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

การแตกสลายเบนซีนโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันในดินเกิดขึ้นทั้งในสถานะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน ในสถานะที่มีออกซิเจน เบนซีนถูกสลายตัวโดยแบคทีเรียอย่างรวดเร็วได้ lactate และ pyruvate (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ตารางที่ 1 ค่าครึ่งชีวิตของเบนซีนในสิ่งแวดล้อม

สิ่งแวดล้อม	ค่าครึ่งชีวิต (half-life, $t_{1/2}$)	คำอธิบาย
อากาศ	50.1 ชั่วโมง – 501 ชั่วโมง (2.09 วัน – 20.9 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ เบนซีน ในอากาศ คำนวณจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดย แสงกับอนุมูลอิสระ hydroxyl ในอากาศ
น้ำผิวดิน	30 ชั่วโมง – 552 ชั่วโมง (1.25 วัน – 23 วัน) 60 ชั่วโมง – 1,104 ชั่วโมง (2.5 วัน – 46 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ เบนซีน คำนวณจาก ปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยชีวภาพในน้ำ แบบใช้ออกซิเจน(aqueous aerobic biodegradation) น้ำใต้ดิน เนื่องจากไม่มี ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเกี่ยวกับการ สลายตัวของ เบนซีน ในน้ำใต้ดิน ดังนั้น จึงคำนวณค่าครึ่งชีวิตของ เบนซีน ในน้ำ ใต้ดินจากค่าครึ่งชีวิตในน้ำผิวดิน
ดิน	30 ชั่วโมง – 552 ชั่วโมง (1.25 วัน – 23 วัน)	ค่าครึ่งชีวิตของ เบนซีน ในดินคำนวณ จากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยชีวภาพใน น้ำแบบใช้ออกซิเจน

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2542)

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศประเภทต่างๆ

ประเทศ/เมือง	ปีที่ทำการ ศึกษา	ความเข้มข้น (ไมโครกรัม/ลูก บาศก์เมตร)	เอกสารอ้างอิง
แคนาดา			
Montreal	1984 – 1986	18.6	Dann, 1987
Toronto	1984 – 1986	9.1	Dann, 1987
สหรัฐอเมริกา			
Houston, Texas	1980	18.8	Singh และคณะ, 1982
Elizabeth and Bayonne, New Jersey	1981	8.6	Wallace และคณะ , 1985
Pittsburgh, Pennsylvania	1981	16.3	Singh และคณะ, 1982
นอร์เวย์			
Oslo	1980	40	Wathne, 1983

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2542)

ส่วนใหญ่การเกิดออกซิเดชันของเบนซีนในน้ำเป็นปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระ hydroxyl และปฏิกิริยาเป็นแบบ second-order หมายความว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับผลคูณของความเข้มข้นของ เบนซีน และอนุมูลอิสระ hydroxyl

$$\frac{-d[\text{เบนซีน}]}{dt} = K_{\text{OH}}[\text{เบนซีน}] [\text{OH}]$$

โดย [เบนซีน] เป็นความเข้มข้นของ เบนซีน เป็นหน่วยโมลาร์

[OH] เป็นความเข้มข้นของอนุมูลอิสระ hydroxyl มีหน่วยเป็น โมลาร์

K_{OH} เป็นค่าคงตัวของอัตราเร็วของปฏิกิริยา มีหน่วยเป็น โมลาร์⁻¹ วินาที⁻¹

ผลของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเบนซีนและอนุมูลอิสระ hydroxyl ในน้ำ คือ phenol และค่าคงตัวของอัตราเร็วของปฏิกิริยา $[K_{OH}]$ เท่ากับ 7.8×10^9 โมลาร์⁻¹ วินาที⁻¹ ทั้งนี้พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเบนซีน และอนุมูลอิสระ hydroxyl เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว (K_{OH} มีค่ามากกว่า 7.8×10^9 โมลาร์⁻¹ วินาที⁻¹) และเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายเบนซีนในแหล่งน้ำที่สำคัญปฏิกิริยาหนึ่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

2. การบำบัดก๊าซเสีย

2.1 การควบแน่น (Condensation)

ก๊าซเสียที่มีสารปนเปื้อนที่มีจุดเดือดสูงเมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดด้วยวิธีนี้ สารปนเปื้อนดังกล่าวบางส่วนอาจถูกทำให้กลั่นตัวใหม่ด้วยวิธีการทำให้ก๊าซเสียเย็นและการอัดความดัน เทคนิคการบำบัดด้วยวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ประหยัดเฉพาะในกรณีที่สารปนเปื้อนที่ถูกบำบัดที่สามารถทำให้กลั่นตัวได้และมีคุณภาพสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตได้อีกครั้ง ถ้าก๊าซเสียถูกผสมกับสารปนเปื้อนตัวอื่นๆหลายชนิด การนำสารปนเปื้อนที่ต้องการกลับมาใช้ใหม่อาจเป็นไปได้ยากและอาจจำเป็นต้องมีการเผาทิ้งของเหลวที่ได้จากการกลั่นตัวนี้ วิธีการบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีนี้บางครั้งอาจต้องมีการเพิ่มวิธีการบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีอื่นรวมด้วย เพื่อให้ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในก๊าซเสียที่ออกจากระบบอยู่ในระดับตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

2.2 การเผา (Incineration)

การใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาในการเผาเป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีประสิทธิภาพในการบำบัดก๊าซเสีย การเผาด้วยความร้อน (Thermal incineration) เป็นวิธีการเผาสารมลพิษที่อุณหภูมิประมาณ 700-1400 องศาเซลเซียส ส่วนวิธีการเผาพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic incineration) จะใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 300-700 องศาเซลเซียสร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างเช่น แพลตินัม (Platinum), พาลเลเดียม (Palladium) และ รูบิเดียม (Rubidium) วิธีการบำบัดก๊าซเสียด้วยการเผานี้เป็นวิธีที่นิยมมาก แต่ค่าใช้จ่ายในการบำบัดจะสูงถ้าก๊าซเสียมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ เพราะจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงเพิ่มเข้าไปในการเผาไหม้ บ่อยครั้งที่มีการพัฒนาหรือการปรับปรุงวิธีการควบคุมระบบความร้อนเพื่อที่จะพยายามลดค่าใช้จ่ายส่วนของเชื้อเพลิงในการเดินระบบ การเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) และไดออกซินเป็นสารมลพิษที่เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจากการ

บำบัดด้วยวิธีการนี้ โดยทั่วไปวิธีการบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีการเผาเป็นวิธีที่เหมาะสมมากสำหรับก๊าซเสียที่มีอัตราการไหลปานกลาง

2.3 การดูดซับ (Adsorption)

โดยปกติแล้ววิธีการบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีการดูดซับนั้นจะประกอบไปด้วยวัสดุดูดซับ อย่างเช่น activated carbon หรือ zeolite ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในลักษณะยึดติดอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ได้ในตัวระบบบำบัด และวิธีการกำจัดก๊าซเสียวิธีนี้ก็เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการบำบัดก๊าซเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อนต่ำ สิ่งที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของระบบนี้คือ อัตราการไหลของก๊าซเสีย, ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยและองค์ประกอบเฉพาะของสารอินทรีย์ระเหย โดยทั่วไปแล้วการบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีดูดซับนิยมใช้ในการควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่มีความดันไอต่ำและมวลโมเลกุลสูง เมื่อวัสดุดูดซับถูกใช้งานไปจนถึงขีดความสามารถในการดูดซับทั้งระบบ ประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการเปลี่ยนวัสดุดูดซับใหม่ และบ่อยครั้งที่วัสดุดูดซับนี้จำเป็นต้องกำจัดในลักษณะที่เป็นของเสียอันตรายทำให้มีค่าใช้จ่ายในส่วนนี้เพิ่มขึ้นอีก ปัญหาการหาจุดพอดีของขีดจำกัดของระบบดูดซับก็เป็นปัญหาหนึ่งที่มักประสบอยู่บ่อยๆ การตัดสินใจที่ผิดพลาดในส่วนของการกำหนดจุดพอดีของการดูดซับนี้อาจทำให้วัสดุดูดซับถูกเปลี่ยนใหม่ก่อนถึงเวลาอันควร ปัญหานี้ก็ทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน วิธีที่ทำให้ activated carbon กลับคืนสภาพ(regeneration)นั้นอาจทำได้ด้วยวิธีการใช้ไอน้ำร้อนหรือลมร้อน แต่เมื่อ activated carbon หมดสภาพจนไม่สามารถใช้วิธีกลับคืนสภาพได้แล้วก็จำเป็นต้องนำไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบหรือการเผาซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงในการดำเนินการเช่นกัน

2.4 การดูดกลืน (Absorption)

การบำบัดก๊าซเสียด้วยวิธีการดูดกลืนเป็นการกำจัดก๊าซเสียรวมกับของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนสารมลพิษ ก๊าซเสียจะผ่านเข้าระบบและสารมลพิษในก๊าซเสียนี้จะเกิดการเคลื่อนย้ายสู่ของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืน การที่จะทำให้ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายมวลสารมลพิษจากก๊าซสู่ของเหลวเกิดได้อย่างสมบูรณ์นั้นทำได้โดยใช้วิธีให้ก๊าซเสียไหลเข้าสู่ระบบที่มีลักษณะเป็นแบบ packed column หรือ bubble column หรือ venturi contactor น้ำเป็นของเหลวที่นิยมใช้เป็นตัวดูดกลืนสารมลพิษด้วยวิธีนี้ สำหรับสารมลพิษที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ สารละลายอินทรีย์อย่างเช่น silicon oil อาจนำมาใช้เป็นตัวดูดกลืนแทนได้ เมื่อการเคลื่อนย้ายของสารมลพิษสู่ของเหลวที่เป็น

ตัวดูดกลืนเกิดขึ้น ของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนนี้ต้องนำไปผ่านการบำบัดต่อไปด้วยวิธีการคายสารมลพิษ(desorbition)ที่อุณหภูมิสูงและเพิ่มการกลายเป็นไอ แต่ถ้าของเหลวที่เป็นตัวดูดกลืนเป็นน้ำ น้ำเสียที่เกิดขึ้นนี้อาจบำบัดด้วยวิธีการส่งไปที่ระบบบำบัดน้ำเสียได้โดยตรง (Devinny, 1999)

2.5 การบำบัดด้วยวิธีชีวภาพ (Biological treatment)

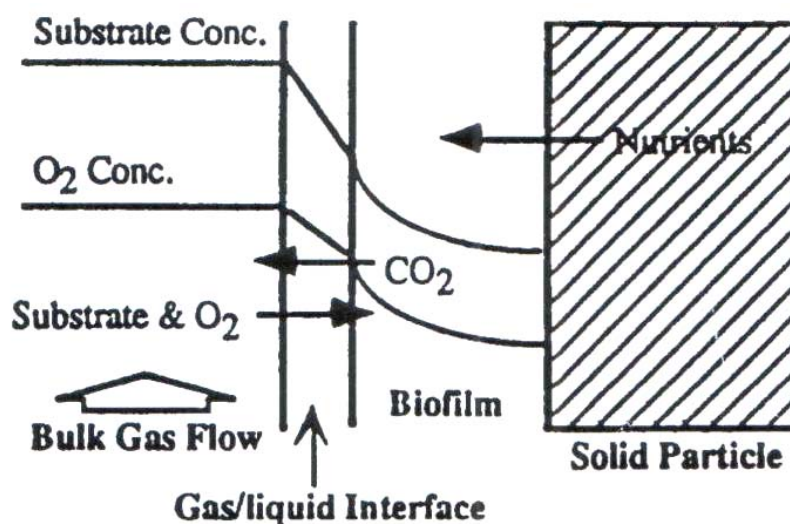
2.5.1 ระบบกรองชีวภาพ (Biofiltration)

ระบบกรองชีวภาพ (Biofiltration) เป็นเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษทางอากาศด้วยวิธีทางชีวภาพ อากาศเสียจะถูกบำบัดโดยการไหลผ่านตัวกลางที่มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ จุลินทรีย์จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารมลพิษที่ต้องการบำบัด และสุดท้ายอากาศที่ได้รับการบำบัดนี้ก็จะมีการคายมลพิษน้อยลงและสามารถปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก

ต้นกำเนิดของระบบการกรองชีวภาพมาจากทวีปยุโรปโดยเริ่มใช้กับการบำบัดกลิ่น ในระยะเวลาต่อมา ระบบนี้ได้มีการพัฒนาให้สามารถบำบัดมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารมลพิษประเภทสารเคมี ด้วยเหตุผลที่ระบบการกรองชีวภาพมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับระบบการบำบัดสารมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดระบบอื่น รวมทั้งผลิตภัณฑ์(End product) ที่เป็นผลจากการบำบัดด้วยระบบนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในปัจจุบันนี้ระบบกรองชีวภาพในหลายประเทศนี้จึงได้รับความนิยมมากขึ้น (Swanson *et al.*, 1997)

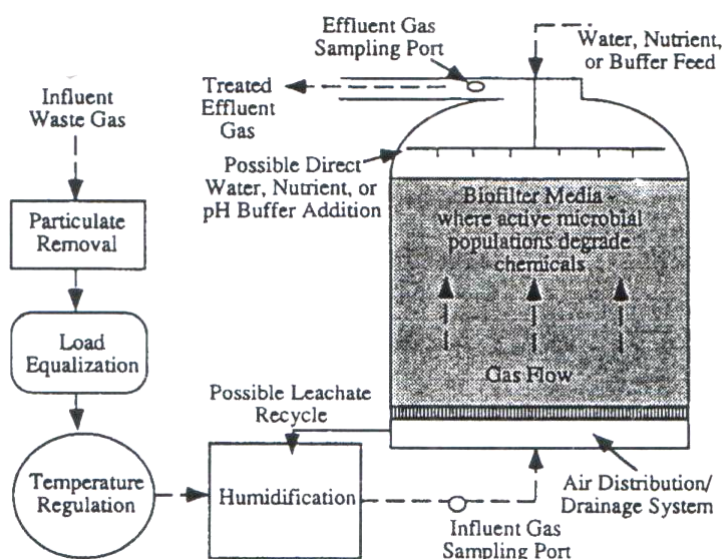
การกรองชีวภาพมีหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการแผ่นฟิล์มชีวภาพ (Biofilm process) คือ มีกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในระบบการกรองหลักๆอยู่ 3 กระบวนการการดังแสดงไว้ในภาพที่ 1 โดยในภาพที่ 1 นี้แสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในระบบกรองชีวภาพและรอบๆ แผ่นฟิล์มชีวภาพ และได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารตั้งต้น(Substrate) เช่นสารอินทรีย์ระเหย(Volatile organic compound:VOC) และปริมาณของก๊าซออกซิเจน กระบวนการแรกที่เกิดขึ้นภายในระบบคือสารเคมีที่อยู่ในสถานะก๊าซ (Gas phase) จะมีการเคลื่อนย้ายในส่วนเชื่อมต่อกันระหว่างก๊าซที่กำลังไหลอยู่ระหว่างช่องว่างภายในระบบกับส่วนที่เป็นของเหลวที่อยู่รอบๆ ตัวกลางที่มีแผ่นฟิล์มชีวภาพเกาะอยู่ จากนั้นสารเคมีจะแพร่ผ่านสู่แผ่นฟิล์มชีวภาพซึ่งแผ่นฟิล์มชีวภาพนี้คือกลุ่มของจุลินทรีย์ที่สามารถปรับสภาพให้สามารถดำรงชีวิตและดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายสารมลพิษที่เข้าสู่ระบบได้ สุดท้ายจุลินทรีย์จะได้พลังงานจากการออกซิโดซ์สารเคมีที่เป็นสารตั้งต้นนี้ ภายในเซลล์ หรือ จุลินทรีย์อาจจะปล่อยเอนไซม์ออกมา

เพื่อที่จะทำการย่อยสลายภาพนอกเซลล์ ในเวลาเดียวกันการแพร่และการใช้สารอาหารอย่างเช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในรูปที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ และก๊าซออกซิเจน ภายในระบบ กรองชีวภาพก็เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน การใช้สารเคมี, ตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) และ สารอาหาร ภายในระบบกรองชีวภาพจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องโดยการแพร่ส่งผ่าน สู่แผ่นฟิล์มชีวภาพ ในการออกแบบและการเดินระบบที่ถูกต้องตามหลักการแล้วนั้นจะสามารถ เปลี่ยนก๊าซเสียที่มีสารเคมีที่ต้องการบำบัดให้เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย (End product) คือ CO_2 , H_2O หรือ เกลืออนินทรีย์ (Inorganic salts) และ มวลชีวภาพ(Biomass)ได้



ภาพที่ 1 แผนภูมิกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นฟิล์มชีวภาพและช่องว่างภายในระบบ กรองชีวภาพ

ที่มา: Swanson *et al.* (1997)



ภาพที่ 2 แผนภูมิระบบกรองชีวภาพ

ที่มา: Swanson *et al.* (1997)

จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบพื้นฐานของระบบกรองชีวภาพ โดยปกติแล้วก๊าซเสียจะถูกส่งผ่านขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) เสียก่อน เพื่อให้ก๊าซเสียที่จะเข้าระบบกรองชีวภาพมีสภาพที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดด้วยวิธีนี้และทำให้ระบบกรองชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การบำบัดก๊าซเสียเบื้องต้นที่กล่าวไว้ข้างต้นประกอบด้วย

1) การกำจัดอนุภาค (Particulate removal)

กระบวนการกำจัดอนุภาคนี้จะป้องกันการอุดตันภายในระบบกรองชีวภาพจากอนุภาคที่ผ่านเข้ามาพร้อมกับก๊าซเสีย

2) การปรับการบรรทุก (Load equalization)

ในกรณีที่ก๊าซเสียมีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยสูง และมีความแปรปรวน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง ระบบปรับการบรรทุกนี้ (ตัวอย่างเช่น ระบบ Granular activated carbon (GAC) ที่มีระยะเวลาักเก็บ (resident time) สั้น) จะช่วยลดปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระเหยที่สูงขึ้น

นี้ได้ในระดับหนึ่ง และเมื่อก๊าซผ่านเข้าระบบกรองชีวภาพ ระบบก็จะสามารถปรับตัวและตอบสนองกับภาระที่เกิดขึ้นจากสภาวะวิกฤตนี้ได้

3) การควบคุมอุณหภูมิ (Temperature regulation)

ก๊าซเสียที่เข้าสู่ระบบอาจจำเป็นต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบ การปรับอุณหภูมิส่วนใหญ่อาจจะอยู่ร่วมกับขั้นตอนการควบคุมความชื้นได้ แต่ถ้าระบบจำเป็นต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซเสียก่อนเข้าระบบกรองชีวภาพ ระบบควบคุมอุณหภูมิก๊าซเสียควรที่จะติดตั้งอยู่ก่อนระบบควบคุมความชื้น เพื่อที่จะป้องกันความชื้นของก๊าซเสียก่อนเข้าระบบกรองชีวภาพลดลง

4) การควบคุมความชื้น (Humidification)

ก๊าซเสียควรที่จะเต็มไปด้วยความชื้นเมื่อเข้าสู่ระบบกรองชีวภาพ เพื่อป้องกันการสูญเสียของตัวกลางชีวภาพ การทำให้ก๊าซเสียที่จะเข้าระบบมีความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียง 100% จะเป็นการบำบัดเบื้องต้นที่สำคัญที่สุด

5) การกระจายก๊าซ (Gas distribution)

เมื่อก๊าซเสียผ่านระบบการควบคุมความชื้นแล้ว ก๊าซเสียจะเข้าสู่ระบบกระจายก๊าซที่ต่อเข้าสู่ตัวกลางของระบบกรองชีวภาพ ระบบการกระจายก๊าซบางระบบอาจอยู่รวมกับระบบรวบรวมน้ำชะที่ไหลผ่านจากตัวกลางระบบกรองชีวภาพได้ น้ำชะที่ไหลลงมานี้เกิดจากการกลั่นตัวหรือจากปริมาณน้ำที่มากเกินไปในระบบกรองชีวภาพ น้ำชะนี้อาจถูกหมุนเวียนเข้าสู่ระบบควบคุมความชื้นเพื่อลดการเกิดน้ำเสียได้ โดยทั่วไปแล้วระบบการกระจายก๊าซและการรวบรวมน้ำชะประกอบไปด้วยท่อที่เจาะรูเอาไว้ ส่วนท่อที่ใช้รวบรวมน้ำจะวางเอาไว้ด้านล่างของระบบกรองชีวภาพและกลับด้วยกรวดเพื่อให้สามารถซึมลงท่อได้

หลังจากที่ก๊าซเสียได้เข้าสู่ระบบกรองชีวภาพซึ่งมีตัวกลางเป็นวัสดุอินทรีย์ตามธรรมชาติ (Natural organic material) ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยใบไม้หมัก(Compost) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถที่จะอาศัยหรือเกาะและเจริญเติบโตได้ เมื่อก๊าซเสียไหลผ่านตัวกลางนี้สารเคมีที่ต้องการกำจัดจะแพร่และถูกย่อยสลายทางชีวภาพ หลังจากนั้นก่อนที่จะไหลออกจากระบบ ก๊าซเสียนี้จะนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ผลิตภัณฑ์ในรูปที่ระเหยได้ (Volatile end products) ที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายและความร้อนที่ถูกปล่อยมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในตัวกลางนี้ สุด

ทำระบบกรองชีวภาพบางระบบจำเป็นต้องมีการเติมน้ำ, สารอาหารหรือพีเอชบัฟเฟอร์(pH buffer) ตามความเหมาะสม เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดีในการบำบัด

2.5.2 ค่าพารามิเตอร์กำหนดคุณภาพของระบบกรองชีวภาพ (Performance Parameter)

ก. ระยะเวลาที่กักเก็บก๊าซในระบบ (Empty Bed Residence Time:EBRT)

ค่าระยะเวลากักเก็บก๊าซในระบบ Empty Bed Residence Time: EBRT (หรือ Empty Bed Contact Time หรือ Empty Bed Detention Time) เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาตรของตัวกรองชีวภาพกับอัตราการไหลของก๊าซ ดังสมการต่อไปนี้

$$EBRT = V_f / Q$$

เมื่อ V_f = ปริมาตรของตัวกรองในระบบ (filter bed) (ลบ.ม., ลบ.ฟุต, ฯลฯ)

Q = อัตราการไหลของก๊าซ (Air flow rate) (ลบ.ม./ชม., ลบ.ฟุต/นาที, ฯลฯ)

แต่ในความเป็นจริง ค่า EBRT ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการนี้เป็นค่า ระยะเวลาที่กักเก็บก๊าซในระบบที่เกินจากความเป็นจริงเล็กน้อยเนื่องจากระยะเวลาที่กักเก็บก๊าซอยู่ใน ระบบจริงจะคำนวณจากค่าปริมาตรของตัวกรองในระบบคูณกับค่าความพรุน (porosity) ของตัว กรองกรองชีวภาพและหารด้วยอัตราการไหลของก๊าซดังสมการต่อไปนี้

$$\tau = (V_f \times \theta) / Q$$

เมื่อ τ = ระยะเวลาที่กักเก็บก๊าซอยู่ในระบบจริง (True resident time) (วินาที, นาที)

θ = ค่าความพรุนของตัวกลาง (porosity) = $\frac{\text{ปริมาตรของช่องว่างของวัสดุตัวกลาง}}{\text{ปริมาตรของวัสดุตัวกลาง}}$

แต่เนื่องจากค่าความพรุนของตัวกลางนั้นเป็นค่าที่แตกต่างกันตามชนิดของ ตัวกลางและค่าความพรุนของแต่ละชนิดของตัวกลางนี้ก็ยังไม่เป็นที่ทราบกันอย่างแน่ชัดทุกชนิด ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่า EBRT มากกว่า

ผลของค่า EBRT และ ค่า τ นั้นจะบอกถึงประสิทธิภาพของระบบกรองชีวภาพในแต่ละชนิด โดยปกติถ้าค่า EBRT และ ค่า τ เพิ่มขึ้นโดยการลดอัตราการไหลของก๊าซเสีย หรือ การเพิ่มปริมาตรตัวกรองในระบบ ประสิทธิภาพของระบบก็จะดีขึ้น

ในกรณีที่มีการบำบัดก๊าซที่มีอัตราการไหลของก๊าซคงที่ วิธีที่จะทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดดีขึ้นเมื่อมีสารมลพิษเข้าสู่ระบบในปริมาณที่มากกว่าเดิมหรือปริมาณที่แปรปรวนคือ การเพิ่มความพรุนของวัสดุตัวกลาง หรือ เพิ่มปริมาตรตัวกรองในระบบ แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของระบบกรองชีวภาพ เพื่อให้ระยะเวลาพักเก็บนานขึ้น ย่อมทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น ระยะเวลาพักเก็บที่เหมาะสมในระบบกรองชีวภาพอยู่ในช่วง 25 วินาที สำหรับการบำบัดกลิ่นหรือสารอินทรีย์ระเหยที่มีปริมาณความเข้มข้นน้อยและจะใช้ระยะเวลามากกว่า 1 นาที สำหรับการบำบัดก๊าซเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเข้มข้นสูง (Devinny *et al.*, 1999)

ข. การบรรทุก (Loading)

1) การบรรทุกในรูปแบบของปริมาตรก๊าซเสีย

1.1) อัตราการบรรทุกต่อพื้นผิว (Surface Loading Rate)

อัตราการบรรทุกต่อพื้นผิวหมายถึงปริมาตรของก๊าซเสียต่อหน่วยพื้นที่วัสดุตัวกรองต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จากค่าอัตราการไหลของก๊าซเสียหารด้วยพื้นที่ตัวกรอง ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Surface Loading} = Q / A$$

เมื่อ A = พื้นที่ตัวกรอง (Filter Area) (ตร.ม, ตร.ฟุต)

เมื่อพิจารณาหน่วยของค่า Surface loading โดยปกติค่านี้จะมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อพื้นที่ต่อเวลา แต่ค่านี้ในบางครั้งอาจแสดงในหน่วย ความยาวต่อเวลา ซึ่งหน่วยนี้อยู่ในมิติของความเร็ว

สำหรับระบบกรองชีวภาพที่ค่า Surface loading เนื่องจากมีอัตราการไหลของก๊าซเสียสูงและมีค่า EBRT ต่ำ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบลดลง

1.2) อัตราการะบรทุกต่อปริมาตร (Volumetric Loading Rate)

อัตราการะบรทุกต่อปริมาตรหมายถึงปริมาตรของก๊าซเสียต่อหน่วยปริมาตรวัสดุตัวกรองต่อหน่วยเวลา ซึ่งคำนวณได้จากค่าอัตราการไหลของก๊าซเสียหารด้วยปริมาตรตัวกรอง ดังสมการต่อไปนี้

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

2) อัตราการะบรทุกมวลสาร (Mass Loading Rate)

ค่าการะบรทุกมวลสารอธิบายในเทอร์มของมวลสารมลพิษที่เข้าระบบต่อหน่วยพื้นที่หรือปริมาตรของวัสดุตัวกรองต่อหน่วยเวลา ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

2.1) อัตราการะบรทุกมวลต่อพื้นที่ (Mass loading (Surface))

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

เมื่อ C_i = ความเข้มข้นของสารมลพิษในก๊าซเสียเข้าระบบ (กรัม/ลบ.ม.)

2.2) อัตราการะบรทุกมวลต่อปริมาตร (Mass loading (Volumetric))

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

อย่างไรก็ตามโดยธรรมชาติของระบบกรองชีวภาพที่เป็นแบบ Plug-flow ทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพส่วนมากเกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของระบบและมวลสารของสารมลพิษจะลดลงตามความยาวของตัวระบบ ในระบบกรองชีวภาพที่เป็นแบบ single biofilter อาจมีประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่างกันภายใต้การะบรทุกมวลเดียวกันเนื่องจากทั้งอัตราการไหลของก๊าซและความเข้มข้นของสารมลพิษมีอิทธิพลต่อค่าการะบรทุกมวล สารอินทรีย์ระเหยที่มีความเข้มข้นสูงสามารถแพร่กระจายเข้าสู่แผ่นฟิล์มชีวภาพและมีการย่อยสลายได้เร็วกว่า ในขณะที่เดียวกันการที่มีอัตราการไหลของก๊าซต่ำ (ค่า EBRT สูง) ทำให้สารมลพิษมีระยะเวลาในการแพร่กระจายนานขึ้น

การควบคุมค่าการะบรทุกมวลของระบบให้เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็นในการเดินระบบเนื่องจากประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่อมีค่าการะบรทุกสูงเกินไป การที่มีค่าการะบรทุกมวลสูงนั้นเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันจากมวลชีวภาพที่เพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดการสะสม

และการระบายสารพิษรวมทั้งการสะสมความเป็นกรดของสารตัวกลางที่เกิดจากปฏิกิริยาย่อยสลายทางชีวภาพ (Devinny *et al.*, 1999)

ก. ความสามารถในการกำจัด (Elimination Capacity: EC)

ค่า EC เป็นค่าการวัดความสามารถในการกำจัดสารมลพิษหรือสารอินทรีย์ระเหยในรูปของค่าการบรรเทาทุกมวล ค่าจำกัดความของค่า EC คือ ปริมาณสารมลพิษหรือสารอินทรีย์ระเหยที่ถูกกำจัดออกไปต่อหน่วยปริมาตรของตัวกลางต่อหน่วยเวลา ค่า EC เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าเหมือนกับค่าการบรรเทาทุกคืออยู่ในมิติของปริมาณสารต่อปริมาตรตัวกลาง ค่า EC จะไม่สามารถใช้อธิบายประสิทธิภาพการกำจัดได้ทั้งระบบถ้าคิดตามความสูงของตัวระบบ ค่าการบรรเทาทุกมวล, ค่า EBRT, ชนิดของตัวกลาง, ชนิดของสารอินทรีย์ระเหยและสถานะต่างๆของสิ่งแวดล้อมในการบำบัด มีอิทธิพลต่อค่า EC ทั้งสิ้น สำหรับในกรณีที่ต้องการให้ระดับการกำจัดเป็นไปตามที่กำหนด ค่า EC จะเป็นตัวกำหนดขนาดของระบบรวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วย ค่า EC หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Devinny *et al.*, 1999)

$$EC = \frac{(C_i - C_o) \times Q}{V_f}$$

เมื่อ C_o = ความเข้มข้นของสารมลพิษในก๊าซเสียออกจากระบบ (กรัม/ลบ.ม.)

ง. ประสิทธิภาพการกำจัด (Removal Efficiency: RE)

ค่า RE เป็นพารามิเตอร์ที่บอกให้รู้วาระบบนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ และเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับผู้ควบคุมระบบ ตัวอย่างของประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงของระบบกรองชีวภาพคือสามารถกำจัดสารประเภท aromatics เช่น เบนซีน, toluene และ xylenes ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึง 95-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่า EBRT ที่เหมาะสม ค่า RE หาได้จากสมการต่อไปนี้ (Devinny *et al.*, 1999)

$$RE = \frac{(C_i - C_o)}{C_i} \times 100$$

2.5.3 ข้อควรพิจารณาในการออกแบบและการดำเนินระบบ

ก. การเลือกตัวกลาง (Media Selection)

การเลือกคุณสมบัติของตัวกลางของระบบกรองชีวภาพนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ระบบสามารถบำบัดสารมลพิษได้ตามความต้องการ ตัวกลางที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) มีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ เช่น สารอาหาร, ความชื้น, pH และปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่อย่างเพียงพอ
- 2) มีพื้นที่ผิวมาก นั้นหมายถึง มีพื้นที่ที่จุลินทรีย์สามารถเกาะอาศัยอยู่ได้มาก, มีความสามารถในการดูดซับสูง และ มีพื้นที่ในการก่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อหน่วยปริมาตรตัวกลางสูง
- 3) มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรง ตัวกลางในระบบกรองชีวภาพนั้นต้องสามารถต้านทานแรงอัดตัวหรือยุบตัวภายในระบบได้เพราะถ้าเกิดการยุบตัวของตัวกลางในระบบจะทำให้ค่า pressure drop สูงขึ้น และลดระยะเวลาที่ก๊าซอยู่ในระบบ
- 4) กักเก็บความชื้นได้สูง ความชื้นเป็นส่วนสำคัญที่รักษาให้จุลินทรีย์สามารถดำรงชีวิตในระบบได้
- 5) มีความพรุนสูง ตัวกลางที่มีความพรุนสูงทำให้ระยะเวลากักเก็บสูงและมี back pressure ต่ำ
- 6) มีความหนาแน่นน้อย เพื่อลดแรงอัดตัวกันของตัวกลางในระบบ

ตัวกลางที่นิยมใช้ในระบบกรองชีวภาพส่วนใหญ่จำพวก ปุ๋ยโบไมท์หมัก, ถ่าน, เปลือกไม้ หรืออาจผสมวัสดุดังกล่าวนี้เข้าด้วยกัน เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้เหล่านี้ประกอบด้วยสารอินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ดังนั้นวัสดุเหล่านี้จึงสามารถสลายตัวตามระยะเวลาที่ใช้งาน ระยะเวลาในการใช้งานหรืออายุของวัสดุเหล่านี้จึงขึ้นอยู่กับอัตราการสลายตัวและการยุบตัวหรือการอัดตัวกันของตัวกลาง เมื่อใช้วัสดุเหล่านี้เป็นเวลานานแล้วเกิดการอัดตัวเพิ่มขึ้นวิธีการพรุนหรือกวาดตัวกลางอาจช่วยยืดอายุได้ระยะหนึ่ง แต่ในที่สุดก็จำเป็นต้องเปลี่ยนตัวกลางใหม่ การผสมวัสดุตัวกลางอินทรีย์นี้กับสารยับยั้งการรวมตัวกันอาจเพิ่มอายุของตัวกลางได้มากกว่า 5 ปี ซึ่งปกติแล้วอายุของตัวกลางทั่วไปอยู่ที่ประมาณ 2-4 ปี ไม่เพียงแต่วัสดุอินทรีย์เท่านั้นที่นำมาใช้เป็นตัวกลางในระบบกรองชีวภาพ วัสดุนินทรีย์อย่างเช่น GAC (Granular Activated Carbon) และ Diatomaceous earth ก็เคยมีการนำมาใช้ด้วยเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามการนำตัวกลางที่เป็นอนินทรีย์มาใช้ในการบำบัดน้ำจะต้องมีการเติมสารอาหารและปริมาณจุลินทรีย์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาระดับปริมาณจุลินทรีย์ภายในระบบให้เหมาะสมต่อการบำบัด

ภายหลังได้มีการปรับปรุงแก้ไขระบบกรองชีวภาพให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ด้วยการเพิ่มวัสดุตัวกลางชนิดต่างๆในระบบ วัสดุที่เพิ่มเข้าไบนั้นมีลักษณะ น้ำหนักเบาและมีความหนาแน่นน้อยเช่น เศษไม้, หินภูเขา, หินทราย หรือ พลาสติกรูปทรงต่างๆ เพื่อลดการอัดตัวแน่น, เพื่อความพรุน, ทำให้ก๊าซเสียกระจายได้อย่างทั่วถึงภายในระบบ, ลดการแตกร้าวของตัวกลาง, ลดปริมาณช่องทางน้ำไหลออกจากระบบ และ ทำให้มีค่า Pressure drop ต่ำ สัดส่วนในการผสมวัสดุเหล่านี้อยู่ที่ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ การใช้ GAC ผสมกับตัวกลางอินทรีย์นั้นเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้แก่ระบบได้ วิธีนี้อาจใช้ในกรณีที่ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเข้าระบบค่อนข้างมาก หรือแปรปรวน ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง

ข. ความชื้น

ความชื้นของตัวกลางระบบกรองชีวภาพเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการควบคุมระบบกรองชีวภาพ ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไม่สามารถควบคุมความชื้นได้ตามความเหมาะสมมีดังต่อไปนี้

1) ตัวกลางระบบกรองชีวภาพขึ้นจนเกินไป

- 1.1) มี back pressure ที่สูงและระยะเวลากักเก็บก๊าซนานเกินไป เนื่องจากช่องว่างภายในระบบเต็มไปด้วยน้ำ
- 1.2) ปัญหาจากการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นสาเหตุจากการลดลงของพื้นที่เชื่อมต่อหรือแลกเปลี่ยนระหว่างอากาศกับน้ำต่อหน่วยปริมาตรแผ่นฟิล์มชีวภาพ
- 1.3) เกิดพื้นที่การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นสาเหตุทำให้เกิดกลิ่นและอัตราการย่อยสลายลดลง
- 1.4) เกิดการชะล้างสารอาหารจากตัวกลางระบบกรองชีวภาพ
- 1.5) จำเป็นต้องมีการกำจัดน้ำชะที่ความเข้มข้นสูงและค่าพีเอชต่ำที่เกิดขึ้น

2) ตัวกลางกรองชีวภาพที่แห้ง

- 2.1) จุลินทรีย์ไม่สามารถดำเนินกิจกรรมย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยได้
- 2.2) การหดตัวและผลของการแตกร้าวของตัวกลาง ทำให้ลดระยะเวลากักเก็บก๊าซ
- 2.3) ถ้าตัวกลางกรองชีวภาพประเภท hydrophobic แห้งจะยากต่อการกลับคืนสู่สภาวะชื้นได้ดังเดิม

ระดับความชื้นของตัวกลางชีวภาพที่เหมาะสมในการเดินระบบอยู่ในช่วง 40-60 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักเปียก) วิธีการควบคุมความชื้นมีอยู่ 3 วิธีคือ

- (1) การทำให้ก๊าซเข้าระบบมีความชื้นซึ่งทำได้ดังต่อไปนี้
 - (1.1) น้ำและก๊าซที่เข้าระบบ ไหลสวนทิศทางการกันในระบบ
 - (1.2) ใช้หัวกระจายน้ำ (atomizers หรือ spray nozzles) เพื่อให้ น้ำมีลักษณะเป็นละอองตรงส่วนที่ก๊าซเข้าระบบ
 - (1.3) เติมน้ำร่วมกับ venture ตรงส่วนก๊าซเข้าระบบ
- (2) เติมน้ำโดยตรงที่ตัวกลางกรองชีวภาพด้วยระบบสเปรย์
- (3) ใช้ทั้ง 2 วิธีรวมกันคือใช้ทั้งตัวควบคุมความชื้นและการเติมน้ำ โดยตรงเป็นระยะๆ

ก. จุลินทรีย์

กลุ่มจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในการบำบัดสารอินทรีย์ระเหยด้วยระบบกรองชีวภาพคือ จุลินทรีย์ประเภท heterotrophs โดยเฉพาะแบคทีเรียและเชื้อราจะเป็นกลุ่มจุลินทรีย์หลักสำหรับก๊าซเสียที่มีสารเคมีประเภทสารอินทรีย์เข้าระบบ จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบลักษณะนี้จะเป็นจุลินทรีย์ประเภท chemoautotrophs ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ถ้าแบ่งแยกตามลักษณะอุณหภูมิในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบกรองชีวภาพส่วนใหญ่จะเป็นจุลินทรีย์ประเภท mesophiles และ thermophiles ลักษณะการดำรงชีวิตและชนิดของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบกรองชีวภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงตามลำดับความลึกของระบบ โดยจุลินทรีย์จะอาศัยอยู่กันอย่างหนาแน่นตรงทางเข้าของก๊าซเสียและจะน้อยลงตามลำดับความลึกของตัวกลางระบบกรองชีวภาพ สำหรับในส่วนที่ลึกเข้าไปตามความยาวของระบบกรองชีวภาพนี้จะมีจำนวนจุลินทรีย์ที่น้อยและมีชนิดของจุลินทรีย์ที่แตกต่างจากจุลินทรีย์ที่อยู่ตรงทางเข้าของระบบเนื่องจากจุลินทรีย์ตรงจุดนี้จะเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นน้อยและมีส่วนประกอบที่ซับซ้อนได้ แต่ในกรณีที่มีจุลินทรีย์อยู่กันอย่างหนาแน่นแต่มีสัดส่วนพื้นที่ต่อระบบกรองชีวภาพน้อยหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ จุลินทรีย์จับกลุ่มกันอย่างหนาแน่นในจุดใดจุดหนึ่ง ไม่มีการกระจายตัวทั่วทั้งระบบ ในส่วนนี้ระบบกรองชีวภาพจะมีการตอบสนองช้าถ้ามีการะบบรทุกเข้ามาในระบบมากอย่างกะทันหัน

ง. ค่าพีเอช

การย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะที่มีออกซิเจนส่วนใหญ่แล้วค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7-8 เนื่องจากระบบกรองชีวภาพนั้นไม่ได้ถูกออกแบบให้มีการไหลเวียนของของเหลวที่จะชะล้างกรดที่เกิดขึ้นในระบบอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมวิธีปรับสภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายทางชีวภาพซึ่งเป็นผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีสภาพเป็นกรด สารปนเปื้อนที่ทำให้ระบบเกิดสภาพความเป็นกรดคือ

- 1) ก๊าซ H_2S และ สารประกอบอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์จะทำให้เกิดกรด H_2SO_4
- 2) แอมโมเนีย และ สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนจะทำให้เกิดกรด HNO_3
- 3) สารอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบจะทำให้เกิดกรด HCl

ถ้าระบบกรองชีวภาพต้องบำบัดสารต่างๆ ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกรดเหล่านี้ระบบนั้นจำเป็นต้องมีขีดความสามารถในการปรับสมดุลของค่าพีเอชที่เกิดขึ้นจากการสะสมของกรดได้ ส่วนสิ่งที่เติมเข้าไปเพื่อปรับสภาพความเป็นกรดที่เกิดขึ้นให้ลดลงนั้นได้แก่ ปูนขาว และ เปลือกหอย เป็นต้น การเติมสารที่ช่วยในการปรับสภาพความเป็นกรดนั้นจะต้องมีปริมาณเพียงพอและเหมาะสมตลอดระยะเวลาที่เดินระบบบำบัด หรือ อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้นอกเหนือจากการเติมสารปรับสภาพความเป็นกรดในตอนแรกก่อนเดินระบบคือการใส่สารละลายพีเอชบัฟเฟอร์ไหลเวียนผ่านระบบเป็นระยะๆ

การเกิดการสะสมของกรดนั้นจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไป สารกรดอินทรีย์เหล่านี้จะเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในตัวกลางระบบกรองชีวภาพโดยปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ ลำดับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในชั้นแผ่นฟิล์มชีวภาพเมื่อระบบกรองชีวภาพมีภาระบรรทุกเกิดขีดความสามารถมีดังต่อไปนี้

ความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงในแผ่นฟิล์มชีวภาพ → ตัวรับอิเล็กตรอนที่หาได้มีไม่เพียงพอ → เกิดการย่อยสลายสารเคมีบางส่วน → เกิดการสะสมของสารประกอบตัวกลางที่เป็นกรด → จี๊ดความสามารถในการปรับสภาพความเป็นกรดของระบบลดลง → ค่าพีเอชลดลง → การทำงานของจุลินทรีย์ทุกยับยั้ง → ระบบล้มเหลว

จ. อุณหภูมิ

การควบคุมระบบกรองชีวภาพในจุลินทรีย์กลุ่ม Mesospheric นั้นอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียส ดังนั้นในการเดินระบบควรที่จะควบคุมให้อุณหภูมิอยู่ในช่วงนี้ด้วย ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิที่ประมาณ 35 องศาเซลเซียสจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนในระบบกรองชีวภาพ ตามทฤษฎีแล้วนั้นการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและการแพร่กระจายเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการละลายน้ำของสารอินทรีย์ระเหยและความสามารถในการดูดซับของตัวกลางในระบบกรองชีวภาพจะเป็นในทางตรงกันข้ามคือจะมีอัตราที่ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหลีกเลี่ยงก๊าซเสียมีอุณหภูมิสูงในการบำบัดด้วยวิธีนี้

แม้ว่าอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมจะทำให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์ลดลง แต่โดยปกติจุลินทรีย์จะสามารถปรับตัวให้พื้นถิ่นสภาพดั้งเดิมได้ ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงการบำบัดก๊าซเสียที่อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมเช่นในการบำบัดสารประเภท phenol และ ammonia ด้วยระบบกรองชีวภาพที่ใช้ตัวกลางเป็นเศษไม้และปุ๋ยไบโหมักในประเทศฟินแลนด์ อุณหภูมิของก๊าซเสียที่เข้าระบบอยู่ในช่วง 27-28 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอกอยู่ที่ประมาณ 0 องศาเซลเซียส ด้วยเหตุนี้ระบบกรองชีวภาพจึงล้มเหลวภายใต้สภาวะดังกล่าว แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียง 4 องศาเซลเซียสระบบก็สามารถกลับมาทำงานได้ภายในระยะเวลา 10 วัน หลังจากที่ระบบล้มเหลวโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษประมาณ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์

นอกจากอุณหภูมิต่ำที่เป็นสาเหตุทำให้ระบบล้มเหลวแล้ว ในทางตรงกันข้ามอุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 50 องศาเซลเซียส ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบกรองชีวภาพล้มเหลวได้เช่นกัน ดังนั้นถ้าก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมก็จำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของก๊าซเสียก่อนเข้าระบบกรองชีวภาพซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (Swanson *et al.*, 1997)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อาทิตย์ และคณะ (2547) ได้ทำการศึกษาการกำจัดเบนซีนโดยกระบวนการกรองชีวภาพโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขายในเชิงการค้าที่มีค่าพื้นที่ผิว BET ที่ได้จากการทดลอง 747.0617 ตารางเมตร/กรัม และมีผลของการกำจัดไธระเหยเบนซีนที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพที่อัตราการไหลของอากาศ 1,000 มิลลิตร/นาที่, 500 มิลลิตร/นาที่ และ 220 มิลลิตร/นาที่ มีค่าเฉลี่ยการดูดซับไธระเหยเบนซีนเท่ากับ 20.147%, 20.274% และ 29.305% โดยน้ำหนักของเบนซีนต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ตามลำดับและพบว่าถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดไธระเหยเบนซีนออกจากอากาศได้มากกว่า 99% แม้ว่าค่าเวลาของการหน่วงเหนี่ยว (residence time) ไธระเหยเบนซีนในหอกรองจะมีค่าน้อยกว่า 1 วินาที ในส่วนของการทดลองการกำจัดไธระเหยเบนซีนที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยวิธีการกรองชีวภาพ พบว่า ถ่านกัมมันต์นี้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตัวกลางในการรองรับเชื้อแบคทีเรีย *Pseudomonas putida*, DMST4075 ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้พบว่าอิทธิพลของความเข้มข้นไธระเหยเบนซีนขาเข้าหอกรองมีผลต่อค่าปริมาณร้อยละในการกำจัดไธระเหยเบนซีนดังนี้ เมื่อให้อัตราการไหลของอากาศคงที่ที่ 220 มิลลิตร/นาที่ (residence time 5.552 วินาที) และทำการลดค่าความเข้มข้นไธระเหยเบนซีนขาเข้าหอกรองจาก 100 พีพีเอ็ม มาเป็น 50 พีพีเอ็ม จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไธระเหยเบนซีนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20% เป็น 35% ในส่วนของอิทธิพลของ residence time มีผล ต่อค่าปริมาณร้อยละในการกำจัดไธระเหยเบนซีนดังนี้คือเมื่อทำการลดอัตราการไหลของอากาศจาก 220 มิลลิตร/นาที่ เป็น 26 มิลลิตร/นาที่ (residence time เพิ่มขึ้นจาก 5.552 วินาที เป็น 46.977 วินาที) และให้ความเข้มข้นไธระเหยเบนซีนขาเข้าหอกรอง 50 พีพีเอ็ม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดไธระเหยเบนซีนออกจากอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 35% เป็น 99% ทำให้ทราบว่าความสามารถในการกำจัดไธระเหยเบนซีนที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยสารกรองชีวภาพคล้ายกันกับวิธีการกำจัดไธระเหยเบนซีนที่ปนเปื้อนในอากาศด้วยวิธีการดูดซับทางกายภาพของถ่านกัมมันต์คือ อิทธิพลของค่าเวลาการหน่วงเหนี่ยวไธระเหยเบนซีนในหอกรองที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนมากกว่าอิทธิพลของค่าความเข้มข้นของไธระเหยเบนซีนขาเข้าหอกรอง

Ramirez *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการทำเกษตร 5 ชนิด ได้แก่ เปลือกถั่วลิสง, แกลบหรือเปลือกข้าว, กะลามะพร้าว, ชานอ้อย และซากต้นข้าวโพด เพื่อนำมาเป็นตัวกลางในระบบกรองชีวภาพ จากผลการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี, กายภาพ และโครงสร้างของวัสดุต่างๆเหล่านี้พบว่า เปลือกถั่วลิสงมีความเป็นไปได้ที่สามารถนำมาใช้เป็นตัวกลางกรองชีวภาพดีที่สุด โดยมีจุดเด่นที่เปลือกถั่วลิสงมีธาตุอาหารไนโตรเจนซึ่งเป็นสารอาหารใน

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนั้นเปลือกถั่วลิสงก็มีพื้นที่ผิวมาก, ความหนาแน่นต่ำ, มีค่าพีเอชเป็นกลาง, จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้มาก, ไม่เสี่ยงต่อการอุดตันภายในระบบ และ ค่าสูญเสียแรงดันมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก วัสดุที่ีีรองลงมาคือแกลบ ส่วนกะลามะพร้าว, ชากต้นข้าวโพด และขานอ้อยนั้นมีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมเท่าไรนัก

Sene *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไอบนซินด้วยระบบกรองชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ โดยตัวกลางต่างกัน 2 ลักษณะ(2 คอลัมน์)คือ คอลัมน์ที่ 1 ตัวกลางประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดผสมกันคือ ขานอ้อยสดและเม็ดลูกแก้ว ส่วนคอลัมน์ที่ 2 ประกอบด้วยวัสดุ 2 ชนิดผสมกันคือ ชากขานอ้อยและเม็ดลูกแก้ว โดยทั้ง 2 คอลัมน์นี้มีปริมาณของวัสดุในสัดส่วนที่เท่ากัน ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซินอย่างต่อเนื่องด้วยสภาวะการเดินระบบเหมือนกันทั้ง 2 คอลัมน์ (ความเข้มข้นของเบนซินเข้าระบบเท่ากับ 10.00, 20.00 และ 50.00 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่ความเร็วของก๊าซเท่ากับ 30.6, 61.2 และ 122.4 เมตร/ชั่วโมง) ประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซเบนซินสูงสุดที่ได้จากการทดลองอยู่ที่การะบรทุกเข้าระบบ 6.12 กรัม/ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง หรือ 3.50 และ 3.80 กรัม/ลูกบาศก์เมตรวัสดุกรอง ชั่วโมง ของขานอ้อยสดและชากขานอ้อย ตามลำดับ

Abumaizar *et al.* (1998) ทำการศึกษาการกำจัดสารมลพิษกลุ่ม BTEX (Benzene, Toluene, Ethyl benzene และ O-Xylene) ด้วยระบบกรองชีวภาพโดยใช้ปุ๋ยพืชหมักผสมกับถ่านกัมมันต์เป็นตัวกลางกรองชีวภาพในระยะเวลาเดินระบบ 82 วัน คอลัมน์กรองชีวภาพประกอบด้วยเศษหญ้าและปุ๋ยพืชหมักผสมกันเป็นวัสดุกรองชีวภาพพื้นฐาน จากผลการทดลองเพิ่มสัดส่วนของการผสมถ่านกัมมันต์(granular activated carbon: GAC) กับปุ๋ยพืชหมักในปริมาตร 2 ใน 3 ของคอลัมน์เพื่อหาขอบเขตของประสิทธิภาพในการบำบัดพบว่าสามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เบนซินเป็นสารที่ถูกกำจัดได้มากที่สุดรองลงมาคือ toluene, ethyl benzene และ o-xylene ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดมีมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเข้าระบบเท่ากับหรือมากกว่า 200 พีพีเอ็ม ของสารมลพิษในแต่ละตัวในกลุ่มBTEX และอัตราบรรทุก๊าซเข้าคอลัมน์เท่ากับ 17.6 ลูกบาศก์เมตร/ตารางเมตร ชั่วโมง ตลอดระยะเวลาทดลอง เมื่อทันทีที่มีการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซหรือความเข้มข้นของBETX เข้าระบบ ระบบกรองชีวภาพที่มี GAC แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดที่สูงขึ้นและกระบวนการกำจัดที่คงที่มากกว่าระบบกรองชีวภาพที่มีเฉพาะปุ๋ยพืชหมักเพียงอย่างเดียว

Namkoong *et al.* (2003) ได้ทำการศึกษาการกำจัดไอของน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยระบบกรองชีวภาพโดยใช้ตัวกลางเป็นปุ๋ยพืชหมักในระยะเวลาการเดินระบบมากกว่า 4 เดือน ความเร็วของก๊าซเข้าระบบเท่ากับ 6 เมตร/ชั่วโมง ซึ่งมีค่าระยะเวลากักเก็บก๊าซในระบบ (Empty Bed Residence Time: EBRT) เท่ากับ 10 นาที benzene, toluene, ethyl benzene และ o-xylene (BTEX) และ Total petroleum hydrocarbon (TPH) มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ค่อนข้างคงที่เมื่อระยะเวลาประมาณ 15 วันหลังจากเริ่มเดินระบบ ประสิทธิภาพการกำจัด TPH และ BTEX เฉลี่ยเท่ากับ 80 และ 85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ที่ระยะเวลาคงที่ 4 เดือน ส่วนของการย่อยสลายทางชีวภาพของ TPH และ BTEX เท่ากับ 60 และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของ THP เข้าระบบต่ำกว่า 7800 มิลลิกรัม THP/ลูกบาศก์เมตร จะมีประสิทธิภาพการกำจัดประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เกิดขึ้นที่ระดับต่ำกว่าครึ่งของระบบกรองชีวภาพ เมื่อความเข้มข้นของ BTEX เข้าระบบต่ำกว่า 720 มิลลิกรัม BTEX/ลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพการกำจัด BTEX จะมีมากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ ในการกำจัดก๊าซเสียที่ระดับต่ำกว่าครึ่งของระบบกรองชีวภาพ ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนมีต่ำที่สุดในกลุ่มของ BTEX ค่า pressure drop ไม่สามารถตรวจวัดได้ตลอดความยาว 1 เมตร ของคอลัมน์ ที่ความเร็วก๊าซ 6 เมตร/ชั่วโมง หลังจากระยะเวลาการเดินระบบประมาณ 4 เดือน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า BTEX ในไอน้ำมันเชื้อเพลิงสามารถบำบัดได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อใช้ระบบกรองชีวภาพปุ๋ยพืชหมัก

อุปกรณ์และวิธีการ

สารเคมีและอุปกรณ์

1. สารเคมี

1.1 สารละลายเบนซีนบริสุทธิ์

2. อุปกรณ์

2.1 ระบบกรองชีวภาพ

ระบบกรองชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้เป็นระบบกรองชีวภาพที่เป็นแบบจำลองในระดับห้องปฏิบัติการวิเคราะห์(Laboratory scale) ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1.1 ป้อนอากาศ

ใช้ป้อนอากาศชนิดที่ใช้กับตู้ปลาพร้อมสายยาง ข้อต่อแบบต่างๆ และวาล์วเพื่อใช้ในการปรับปริมาณอากาศที่จะเข้าระบบ

2.1.2 แหล่งกำเนิดไอของเบนซีน

แหล่งกำเนิดไอของเบนซีนประกอบด้วยภาชนะขวดแก้วขนาด 1 ลิตร ภายในขวดบรรจุด้วยสารละลายเบนซีน จำนวน 1 ขวด

2.1.3 แหล่งกำเนิดความชื้น

แหล่งกำเนิดความชื้นประกอบด้วยภาชนะขวดพลาสติกขนาด 6 ลิตร ภายในขวดบรรจุด้วยน้ำกลั่น จำนวน 1 ขวด

2.1.4 ชุดผสมอากาศ (Mixing chamber)

ชุดผสมอากาศประกอบด้วยภาชนะขวดแก้วขนาด 1 ลิตร

2.1.5 คอลัมน์กรองชีวภาพ

คอลัมน์กรองชีวภาพทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ภายในคอลัมน์กรองชีวภาพบรรจุด้วยตัวกลางกรองชีวภาพสูง 50 เซนติเมตร ดังนั้นจะมีปริมาตรของตัวกลางกรองชีวภาพประมาณ 1 ลิตร (1013.41 มิลลิลิตร) ต่อหนึ่งคอลัมน์กรองชีวภาพ ทำช่องสำหรับ

ระบายน้ำชะทางด้านล่างของคอลัมน์ จุดเก็บตัวอย่างอากาศและจุดวัดพารามิเตอร์ต่างๆ มีทั้งหมด 4 จุด ดังต่อไปนี้

จุดที่ 1 เป็นจุดเก็บตัวอย่างอากาศและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอากาศก่อนเข้าคอลัมน์กรองชีวภาพ

จุดที่ 2 และ จุดที่ 3 ทำการเจาะรูที่คอลัมน์เพื่อเป็นจุดสำหรับเก็บตัวอย่างอากาศและวัดพารามิเตอร์อื่นๆ ภายในคอลัมน์ที่ความสูงจากฐานตัวกรองชีวภาพ 16.5 เซนติเมตร และ 33.0 เซนติเมตร ตามลำดับ

จุดที่ 4 เป็นจุดเก็บตัวอย่างอากาศและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของอากาศที่ออกจากระบบกรองชีวภาพ

ระบบกรองชีวภาพ 1 ชุดประกอบไปด้วยคอลัมน์กรองชีวภาพ 2 คอลัมน์โดยแต่ละคอลัมน์จะบรรจุตัวกลางกรองชีวภาพต่างชนิดกัน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 3

2.2 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ Testo รุ่น 405-V1

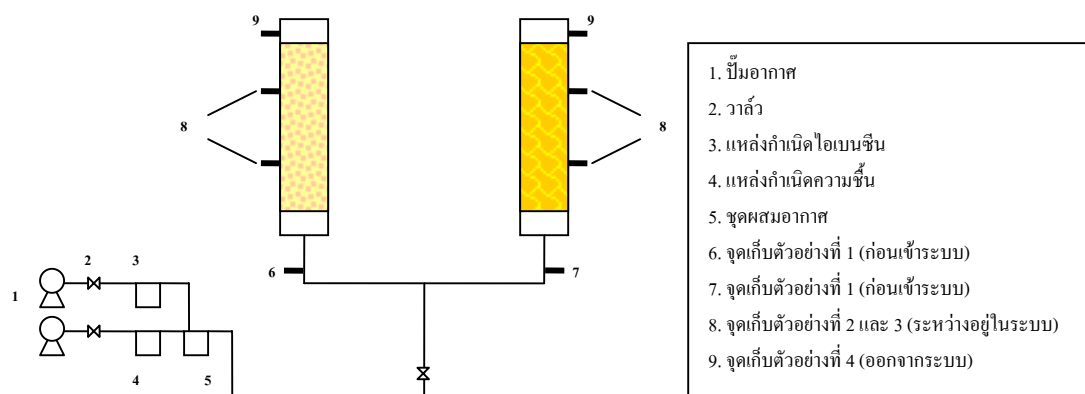
2.3 เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศยี่ห้อ Testo รุ่น 605 H1

2.4 เครื่องวัดค่า pH ยี่ห้อ Testo รุ่น 205

2.5 เทอร์โมมิเตอร์

2.6 เครื่อง Gas chromatograph ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800

2.7 Gas Tight Syringe ขนาด 5 มิลลิลิตร



ภาพที่ 3 ระบบกรองชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการ

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและควบคุมระบบกรองชีวภาพ คุณสมบัติทั่วไปของเบนซีน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ออกแบบและติดตั้งระบบกรองชีวภาพดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในหัวข้อสารเคมีและอุปกรณ์

3. เตรียมตัวกลางกรองชีวภาพ

ตัวกลางที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดเบนซีนครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ เปลือกถั่วลิสง (Peanut shell) และ แกลบ (Rice husk) โดยมีวิธีการเตรียมดังต่อไปนี้

3.1. ตัวกลางเปลือกถั่วลิสง

นำเปลือกถั่วลิสงมาคัดขนาดให้มีขนาดประมาณ 3 - 5 เซนติเมตร บรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์กรองชีวภาพจนได้ความสูงตามที่กำหนด พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของเปลือกถั่วลิสงที่บรรจุ

3.2. ตัวกลางแลกเปลี่ยน

ทำการคัดขนาดของแลกเปลี่ยนที่ใช้ในการทดลองโดยการนำไปร่อนผ่านตะแกรง จากนั้นนำแลกเปลี่ยนที่ได้ไปบรรจุลงในคอลัมน์กรองชีวภาพจนได้ความสูงตามที่กำหนด พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของแลกเปลี่ยนที่บรรจุ

4. การทดลองเดินระบบกรองชีวภาพมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ในการเดินระบบ หลังจากทีบรรจุตัวกลางกรองชีวภาพลงในคอลัมน์เรียบร้อยแล้ว จะทำการรดน้ำเสียที่ได้จากบ่อเอเสของระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางนิคมอุตสาหกรรมแหลมฉบัง จังหวัดชลบุรี เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์ในน้ำเสียเกาะติดกับตัวกลางกรองชีวภาพ จากนั้นเดินเครื่องปั๊มอากาศ อากาศส่วนหนึ่งจะผ่านมายังแหล่งกำเนิดไอบนซิน และอีกส่วนหนึ่งจะผ่านมายังแหล่งกำเนิดความชื้น หลังจากนั้นอากาศทั้งสองส่วนจะไหลมารวมกันยังชุดผสมอากาศแล้วไหลออกจากชุดผสมอากาศ จากนั้นอากาศจะไหลเข้าสู่แต่ละคอลัมน์ทางด้านล่างของคอลัมน์ และสุดท้ายอากาศจะไหลออกจากคอลัมน์สู่บรรยากาศภายนอกทางด้านบนของคอลัมน์

ในการทดลองครั้งนี้จะทำการเดินระบบที่สภาวะต่างๆดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ที่สภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที (ความเร็วของอากาศ ณ จุดตรวจวัดเท่ากับ 0.01 เมตร/วินาที) ความเข้มข้นของเบนซินเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม และ 100 พีพีเอ็ม

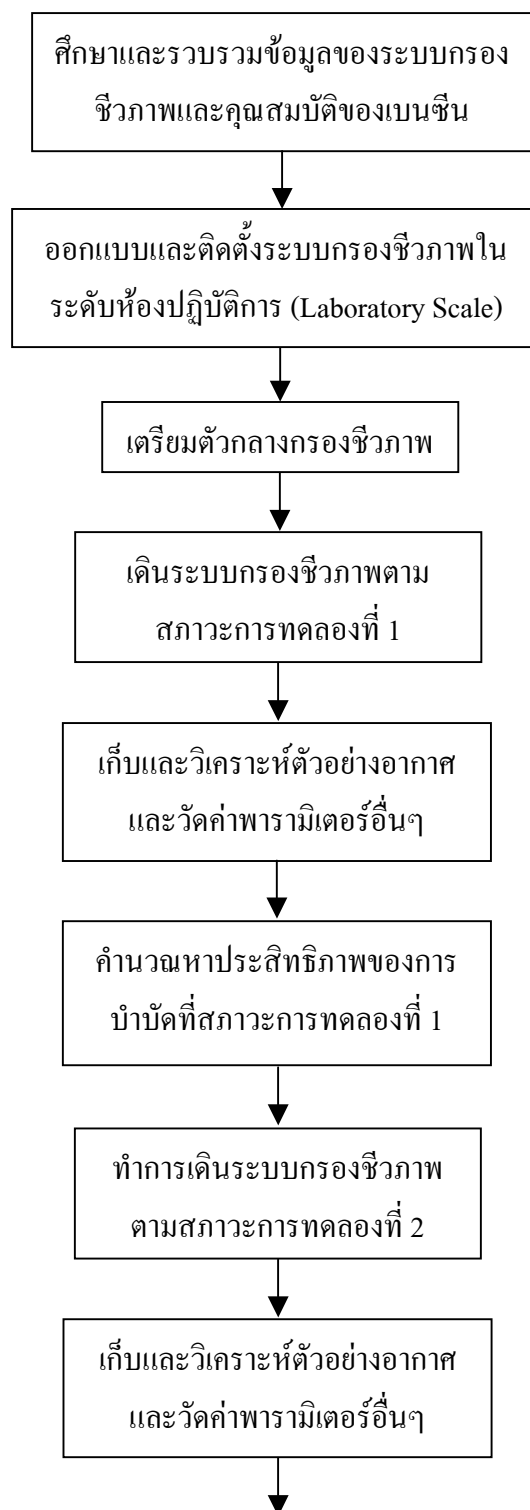
การทดลองที่ 2 ที่สภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาที (ความเร็วของอากาศ ณ จุดตรวจวัดเท่ากับ 0.02 เมตร/วินาที) ความเข้มข้นของเบนซินเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม และ 100 พีพีเอ็ม

การทดลองที่ 3 ที่สภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 1.27 ลิตร/นาที (ความเร็วของอากาศ ณ จุดตรวจวัดเท่ากับ 0.03 เมตร/วินาที) ความเข้มข้นของเบนซินเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม และ 100 พีพีเอ็ม

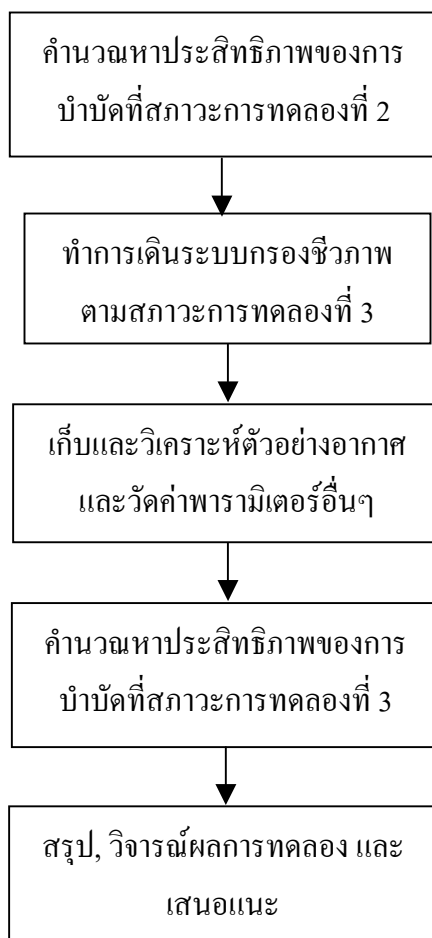
ในระหว่างการเดินระบบ ควบคุมปริมาณอากาศเข้าระบบโดยการวัดความเร็ว ณ จุดอากาศเข้าในแต่ละคอลัมน์ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม และวัดความชื้นของอากาศที่เข้าระบบด้วยเครื่องวัดความชื้นในอากาศ ทำการวัดปริมาณเบนซีนในอากาศตามจุดเก็บตัวอย่างอากาศทั้ง 4 จุด โดยเก็บตัวอย่างอากาศปริมาตร 1 มิลลิลิตรด้วย Gas Tight Syringe ขนาด 5 มิลลิลิตร จากนั้นฉีดตัวอย่างเข้าเครื่อง Gas chromatograph โดยมีดีเทคเตอร์เป็นแบบ FID ตรวจวัดอุณหภูมิทั้ง 4 จุดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ ตรวจวัดค่าพีเอชด้วยเครื่องวัดพีเอช

5. คำนวณหาประสิทธิภาพของระบบในแต่ละชนิดตัวกลางกรองชีวภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้ในแต่ละสภาวะการเดินระบบ

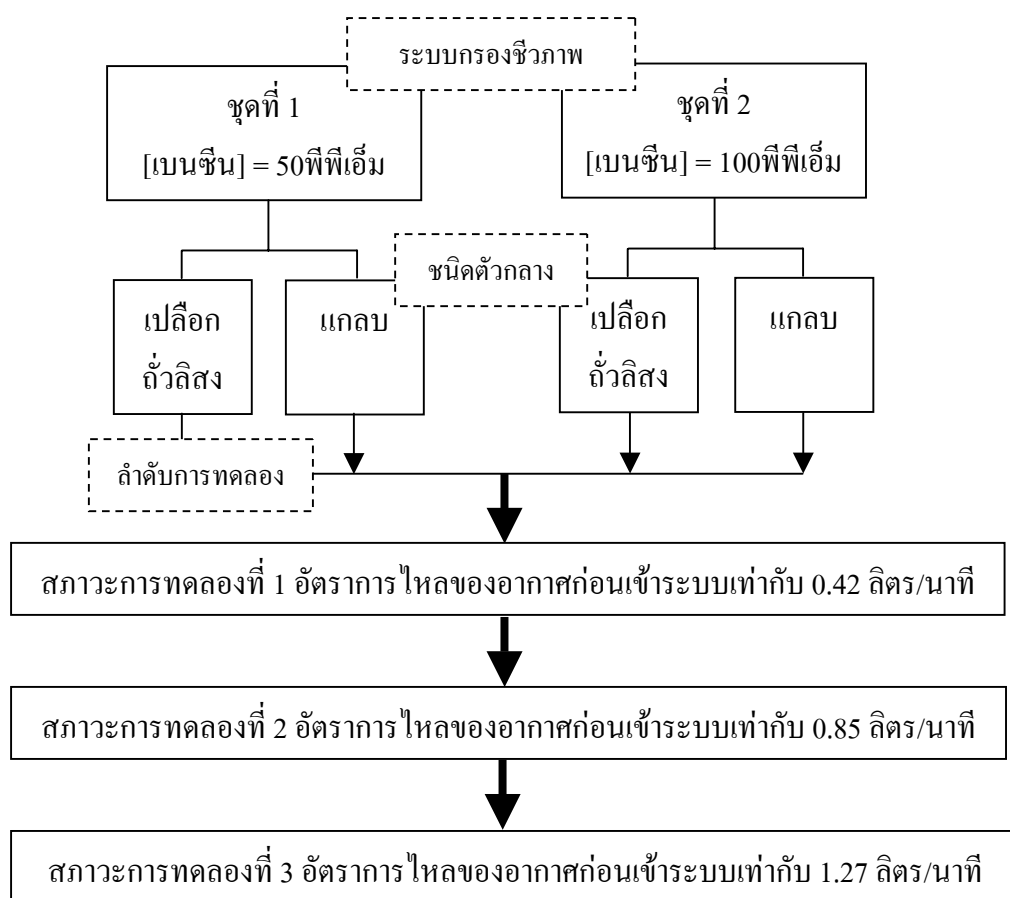
ขั้นตอนในการทดลองและขั้นตอนในการเดินระบบได้แสดงไว้ในดังภาพที่ 4 และภาพที่ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการทดลอง



ภาพที่ 4 (ต่อ)



ภาพที่ 5 ลำดับการเดินระบบ

ผลการทดลองการบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนเบนซีนด้วยระบบกรองชีวภาพ

1. ตัวกลางเปลือกล้วนลิสง

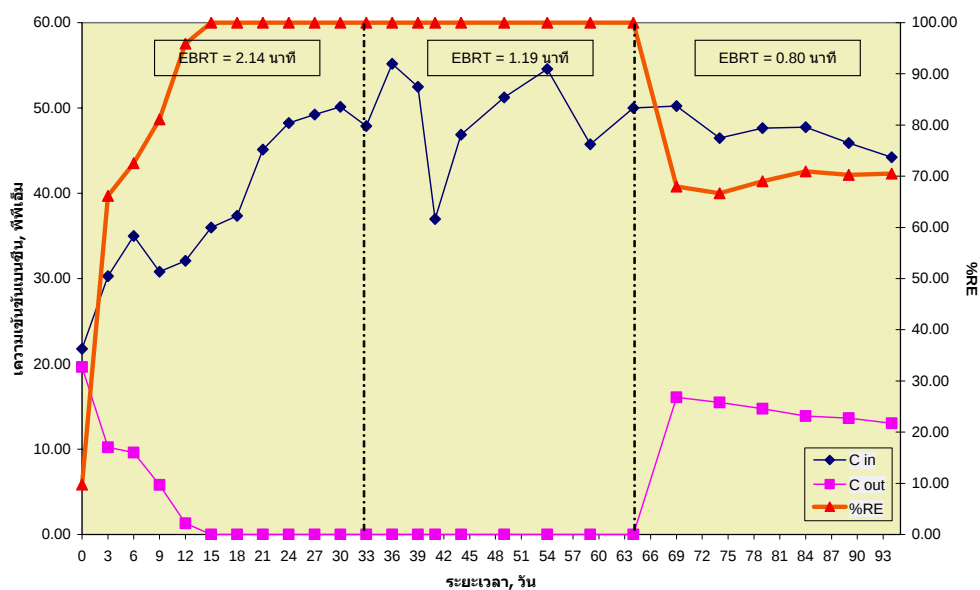
1.1 ประสิทธิภาพการกำจัด

จากการทดลองเดินระบบกรองชีวภาพโดยมีตัวกลางกรองชีวภาพเป็นเปลือกล้วนลิสงที่อัตราไหลของอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่ พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ที่ระยะเวลาประมาณ 15 วันหลังจากวันแรกที่เริ่มเดินระบบ จากนั้นจึงเริ่มหาประสิทธิภาพของระบบที่สภาวะการทดลองแรก ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

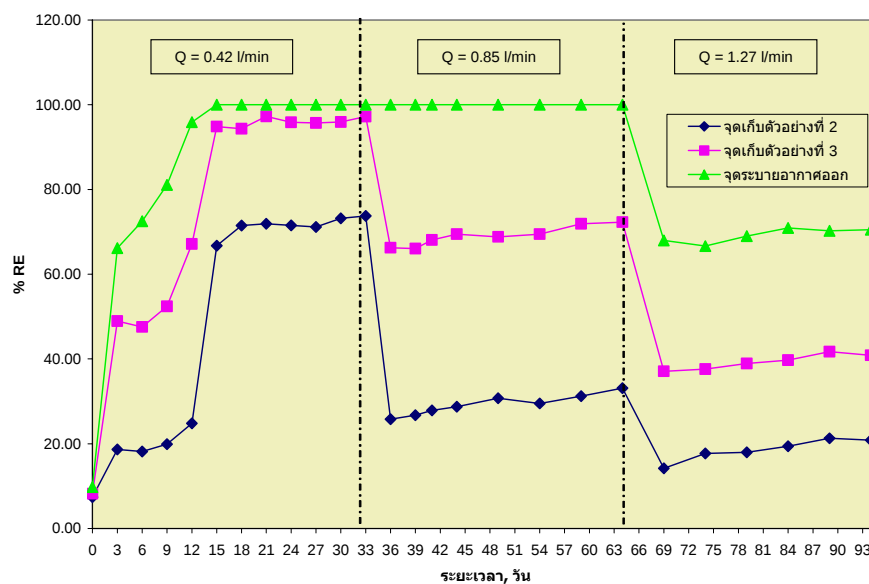
1.1.1 ที่ความเข้มข้นเบนซีนในอากาศประมาณ 50 พีพีเอ็ม

จากผลการทดลองที่สภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่ ,0.85 ลิตร/นาที่ และ 1.27 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์(มีค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที่, 1.19 นาที่ และ 0.80 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 100%, 100% และ 69.22% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6 และ ตารางผนวกที่ 1 - ตารางผนวกที่ 3

ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (มีค่า EBRT เท่ากับ 0.80 นาที่, 0.39 นาที่ และ 0.26 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 71.40%, 29.21% และ 18.57% ตามลำดับ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 (มีค่า EBRT เท่ากับ 1.60 นาที่, 0.79 นาที่ และ 0.53 นาที่ ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนเฉลี่ยเท่ากับ 95.89%, 69.05% และ 39.33%ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 7 และ ตารางผนวกที่ 1 - ตารางผนวกที่ 3



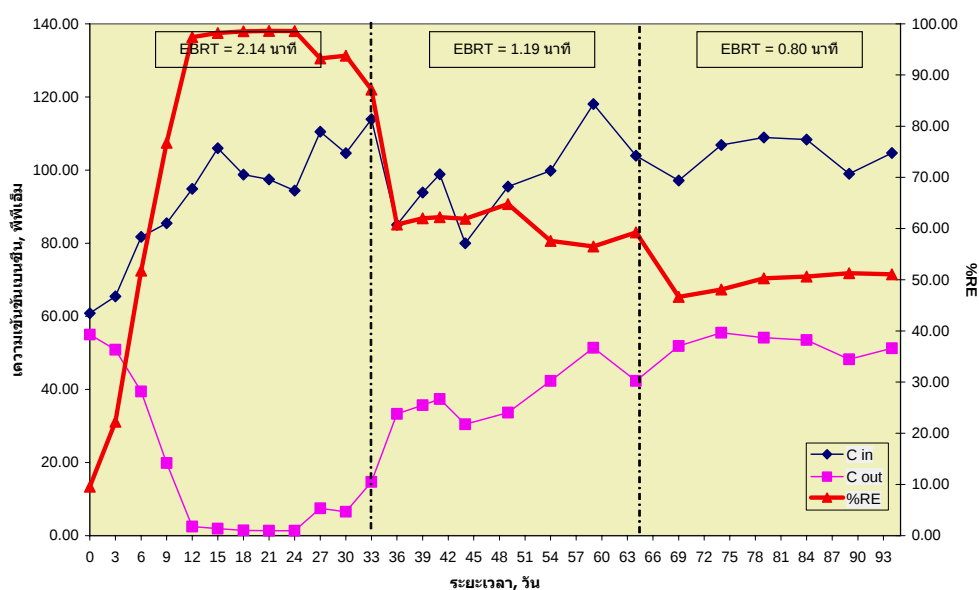
ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง



ภาพที่ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างแต่ละตำแหน่ง ด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง

1.1.2 ที่ความเข้มข้นเบนซีนในอากาศประมาณ 100 พีพีเอ็ม

จากผลการทดลองสภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่, 0.85 ลิตร/นาที่ และ 1.27 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ (มีค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที่, 1.19 นาที่ และ 0.80 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 95.45 %, 60.63 % และ 49.66% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 8 และ ตารางผนวกที่ 4 - ตารางผนวกที่ 6

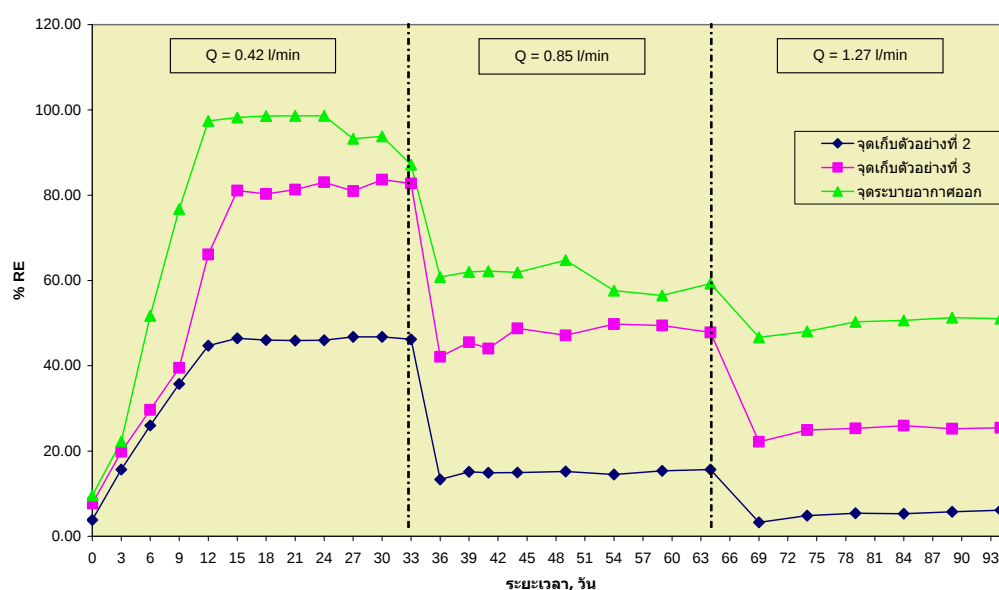


ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง

ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (มีค่า EBRT เท่ากับ 0.80 นาที่, 0.39 นาที่ และ 0.26 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 46.31%, 14.98% และ 5.12% ตามลำดับ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 (มีค่า EBRT เท่ากับ 1.60 นาที่, 0.79 นาที่ และ 0.53 นาที่ ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนเฉลี่ยเท่ากับ 81.87%, 46.82% และ 24.84% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 9 และ ตารางผนวกที่ 4 - ตารางผนวกที่ 6

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ 50 พีพีเอ็ม ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดถึง 100% ที่ค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที่ และ 1.19 นาที่

จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเหลือเท่ากับ 69.22% ที่ค่า EBRT ลดลงเท่ากับ 0.80 นาที ส่วนที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 95.45 %, 60.63 % และ 49.66% ที่ค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที, 1.19 นาที และ 0.80 นาที ตามลำดับ โดยรวมแล้วประสิทธิภาพจะลดลงตามค่า EBRT ที่ลดลงตามด้วย



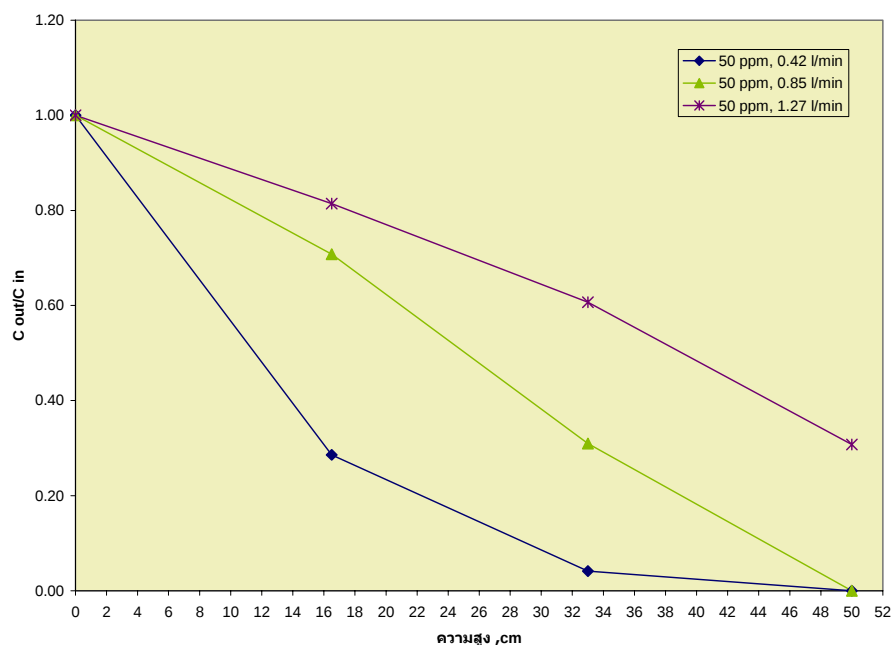
ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างแต่ละตำแหน่งด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง

1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนเข้าระบบ ต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบ

เมื่อนำผลการตรวจวัดปริมาณเบนซีนในอากาศที่เข้าระบบและออกจากระบบกรองชีวภาพมาคำนวณและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนเข้าระบบต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 10, ภาพที่ 11

จากภาพที่ 10 และภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่าระดับความสูงของคอลัมน์มีผลต่อระดับความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศที่ผ่านคอลัมน์ด้วยเนื่องจากระยะเวลาที่อากาศอยู่ในคอลัมน์จะ

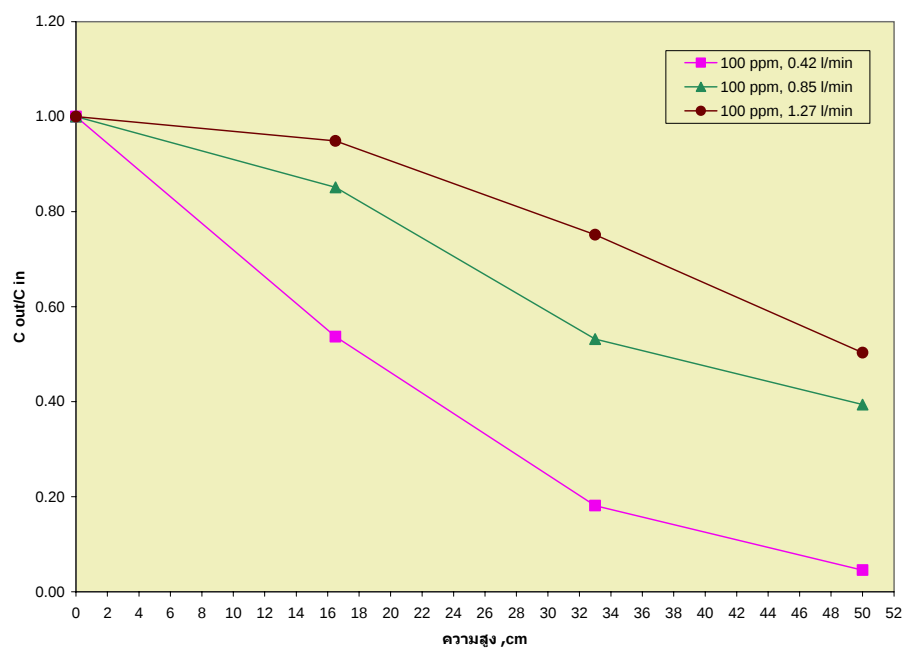
เพิ่มขึ้นตามลำดับความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่าประสิทธิภาพก็จะเพิ่มตามด้วยเช่นกัน (Devanny *et al.*, 1999)



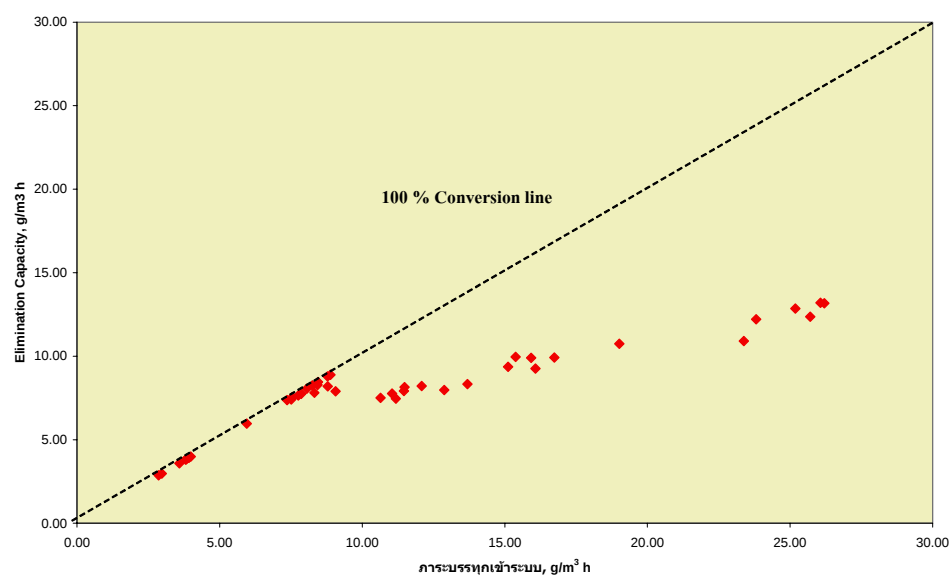
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนเข้าระบบ 50 พีพีเอ็ม ต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง

1.3 ความสัมพันธ์ค่าภาระบรรทุกของระบบ (Loading) กับ ความสามารถในการกำจัดเบนซีน (Elimination Capacity: EC) ในอากาศด้วยระบบกรองชีวภาพ

ผลการหาความสัมพันธ์ค่าภาระบรรทุกของระบบ (Loading) กับ ความสามารถในการกำจัดเบนซีน (Elimination Capacity: EC) ในอากาศด้วยระบบกรองชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนในระบบ 100 พีพีเอ็ม ต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการระบรทุกของระบบกับความสามารถการกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง

จากภาพที่ 12 แสดงถึงความสัมพันธ์ของภาระบรรทุกของระบบกับความสามารถในการกำจัดเบนซีนของระบบกรองชีวภาพด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง จะเห็นว่าในช่วงแรกของการเดินระบบและที่สภาวะการทดลองที่มีภาระบรรทุกต่ำๆ ระบบจะยังคงสามารถที่จะรองรับการกำจัดได้อยู่ซึ่งจะเห็นได้จากแนวโน้มของจุดความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ตัวแปร ที่มีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง แต่เมื่อระบบมีภาระบรรทุกที่สูงขึ้นระดับหนึ่ง ระบบก็จะเริ่มมีแนวโน้มความสามารถในการกำจัดที่เบี่ยงเบนออกจากความสัมพันธ์เดิมในตอนแรก ซึ่งระดับที่ภาระบรรทุกของระบบเท่ากับที่ระดับความสามารถกำจัดสูงสุด ตรงนี้เรียกว่า ระดับความสามารถในการกำจัดวิกฤต (Critical Elimination Capacity) และเมื่อระดับภาระบรรทุกสูงขึ้นไปอีก ความสามารถกำจัดของระบบก็จะเริ่มคงที่ ซึ่ง ณ ระดับที่ระบบมีค่าการกำจัดที่คงที่นี้จะเรียกว่า ระดับความสามารถในการกำจัดสูงสุดของระบบ (Maximum Elimination Capacity) (Devinny *et al.*, 1999)

1.4 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมและติดตามการทำงานของระบบ

จากการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

1.4.1 ความชื้น

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการวัดค่าความชื้นในอากาศก่อนเข้าระบบโดยจะพยายามควบคุมความชื้นในอากาศก่อนเข้าระบบให้อยู่ที่ประมาณ 95 - 99 % เพื่อที่จะรักษาความชื้นภายในคอลัมน์กรองชีวภาพ และจะทำการรดน้ำที่ด้านบนของคอลัมน์เพื่อช่วยรักษาระดับความชื้นภายในคอลัมน์อีกส่วนหนึ่ง ผลการตรวจวัดความชื้นของอากาศก่อนเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยในแต่ละสภาวะการทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่ 97.41% - 99.99% และดังแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 7 - ตารางผนวกที่ 12

1.4.2 ค่า pH

ในการทดลองครั้งนี้จะมีปัญหาการในเรื่องของการวัดค่า pH เนื่องจากในการวัด pH ของตัวกลางในระบบเป็นไปได้ยาก เพราะลักษณะของตัวกลางมีขนาดชิ้นใหญ่และแข็งเมื่อสอด prob วัด pH วัสดุตัวกลางจะมีโอกาสสัมผัสกับ prob วัด pH น้อย ตัวเลขที่ได้นั้นจึงไม่ถูกต้องเท่าไรนัก ผู้วิจัยจึงทำการแก้ไขวิธีการวัดค่า pH โดยการใช้ universal indicator ในการวัดค่า pH แทน ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะได้อ่านค่า pH ที่ไม่ละเอียดแต่ก็พอที่จะทราบระดับ pH อย่างคร่าวๆ ซึ่งก็เพียงพอที่จะทราบถึงสภาวะความเป็นกรดความเป็นด่างของตัวกลางได้

จากผลการตรวจวัดค่า pH ในระหว่างการเดินระบบที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 50 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 และจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6 ทั้ง 2 จุด และที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 100 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 และจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6 ทั้ง 2 จุด ดังแสดงผลการวัดค่า pH ไว้ในตารางผนวกที่ 7 - ตารางผนวกที่ 12

จากผลการตรวจวัดค่า pH นี้แสดงให้เห็นว่า ค่า pH ที่ได้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ซึ่งเหมาะสมกับการทำงานของระบบกรองชีวภาพ

1.4.3 อุณหภูมิ

จากผลการตรวจวัดอุณหภูมิ ในระหว่างการเดินระบบที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 50 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศเข้าระบบ, จุดเก็บตัวอย่างที่ 2, จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และจุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ได้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่สภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 29.3, 29.3, 29.4 และ 29.5 องศาเซลเซียส ที่สภาวะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 29.9, 30.0, 30.0 และ 30.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และ ที่สภาวะการทดลองที่ 3 เท่ากับ 30.1, 30.2, 30.3 และ 30.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 100 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศเข้าระบบ, จุดเก็บตัวอย่างที่ 2, จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และจุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ได้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่สภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 29.2, 29.2, 29.4 และ 29.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่สภาวะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 29.4, 29.6, 29.9 และ 30.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และ ที่สภาวะการทดลองที่ 3 เท่ากับ 29.9, 30.1, 30.4 และ 30.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 7 และตารางผนวกที่ 12

2. ตัวกลางแกลบ

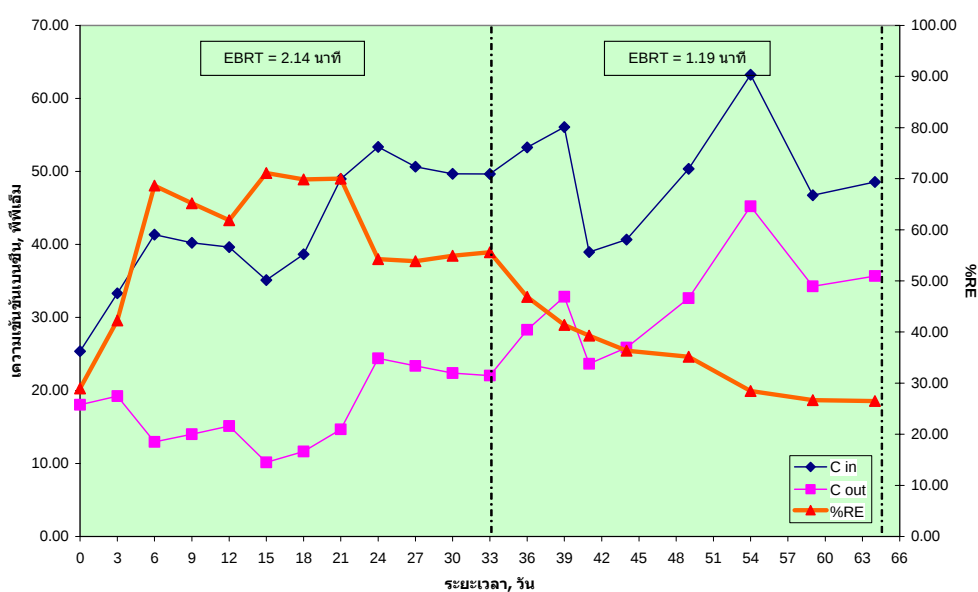
2.1 ประสิทธิภาพการกำจัด

ในการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนในระบบกรองชีวภาพด้วยตัวกลางแกลบครั้งนี้ จากผลการทดลองที่ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วยตัวกลางชนิดนี้ได้ผลการกำจัดที่ไม่ค่อยดีเท่าที่ควรตั้งแต่สภาวะการทดลองที่ 1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลองเฉพาะที่สภาวะการทดลองที่ 1 และ 2 เท่านั้น ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

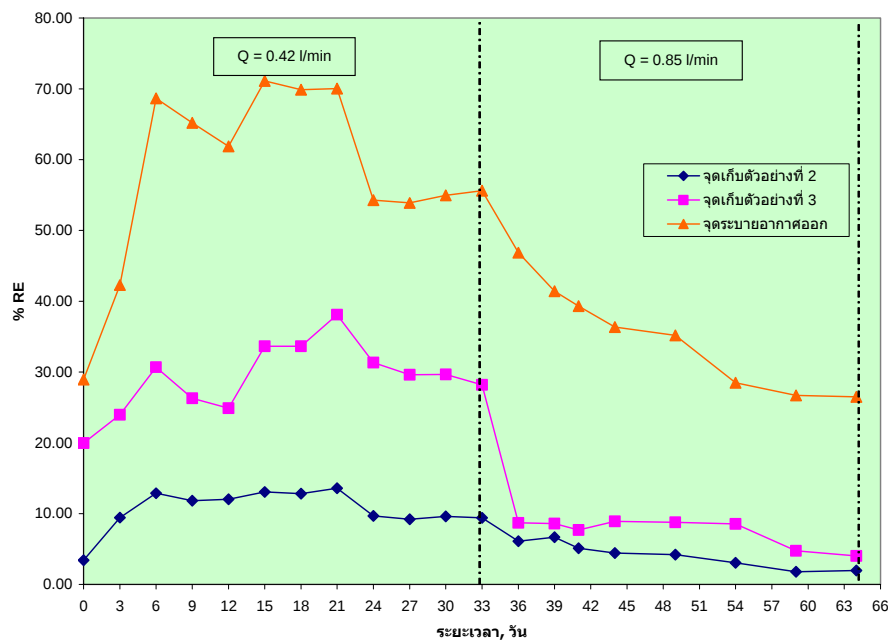
2.1.1 ที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศประมาณ 50 พีพีเอ็ม

จากผลการทดลองสภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่, 0.85 ลิตร/นาที่ และ 1.27 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ (มีค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที่ และ 1.19 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 61.38 % และ 35.10% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 13, ตารางผนวกที่ 13 และตารางผนวกที่ 14

ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (มีค่า EBRT เท่ากับ 0.80 นาที่ และ 0.39 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 11.06% และ 4.17% ตามลำดับ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 (มีค่า EBRT เท่ากับ 1.60 นาที่ และ 0.79 นาที่ ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน เฉลี่ยเท่ากับ 32.03% และ 7.05% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 14, ตารางผนวกที่ 13 และตารางผนวกที่ 14



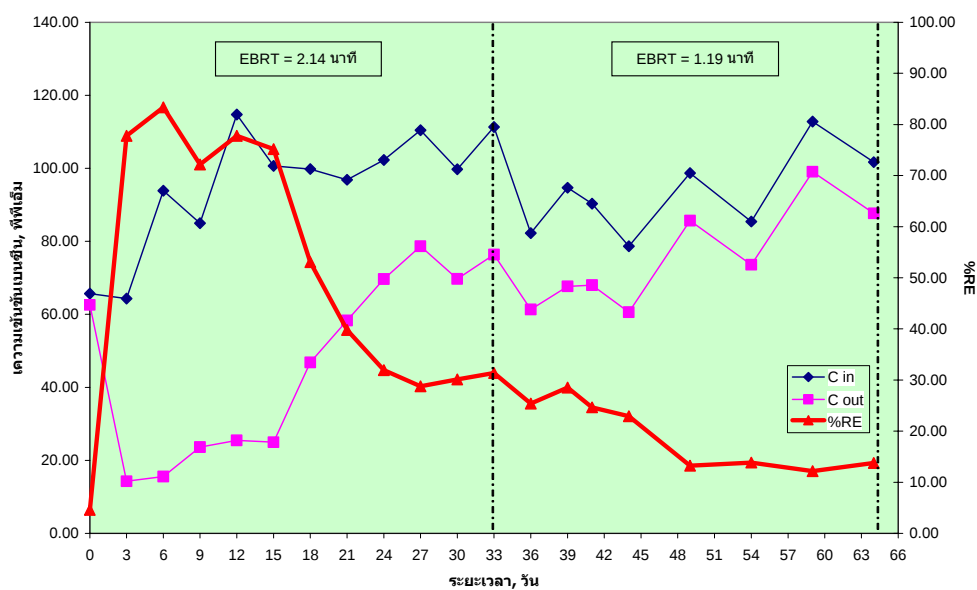
ภาพที่ 13 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ด้วยตัวกลางเกลบ



ภาพที่ 14 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 50 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างแต่ละตำแหน่งด้วยตัวกลางเกลบ

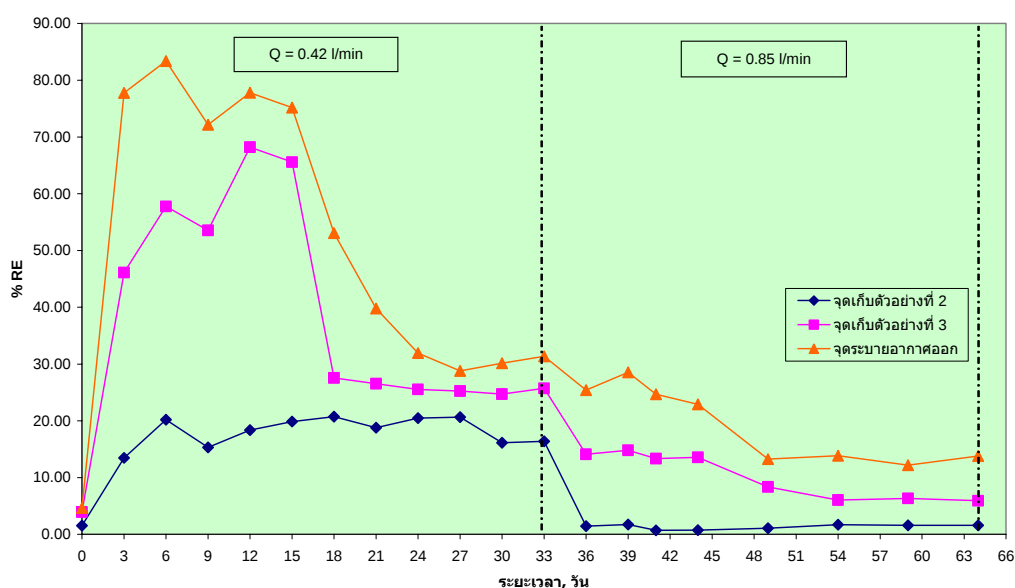
2.1.2 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศประมาณ 100 พีพีเอ็ม

จากผลการทดลองสภาวะอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่, 0.85 ลิตร/นาที่ และ 1.27 ลิตร/นาที่ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ (มีค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที่ และ 1.19 นาที่ ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 41.47 % และ 19.33% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 15, ตารางผนวกที่ 15 และตารางผนวกที่ 16



ภาพที่ 15 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ด้วยตัวกลางเกลบ

ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (มีค่า EBRT เท่ากับ 0.80 นาที และ 0.39 นาที ตามลำดับ) เฉลี่ยเท่ากับ 19.01% และ 1.33% ตามลำดับ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 (มีค่า EBRT เท่ากับ 1.59 นาที และ 0.79 นาที ตามลำดับ) มีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน เฉลี่ยเท่ากับ 31.56% และ 10.32%ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 16, ตารางผนวกที่ 15 และตารางผนวกที่ 16



ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนที่ความเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างแต่ละตำแหน่งด้วยตัวกลางเกลบ

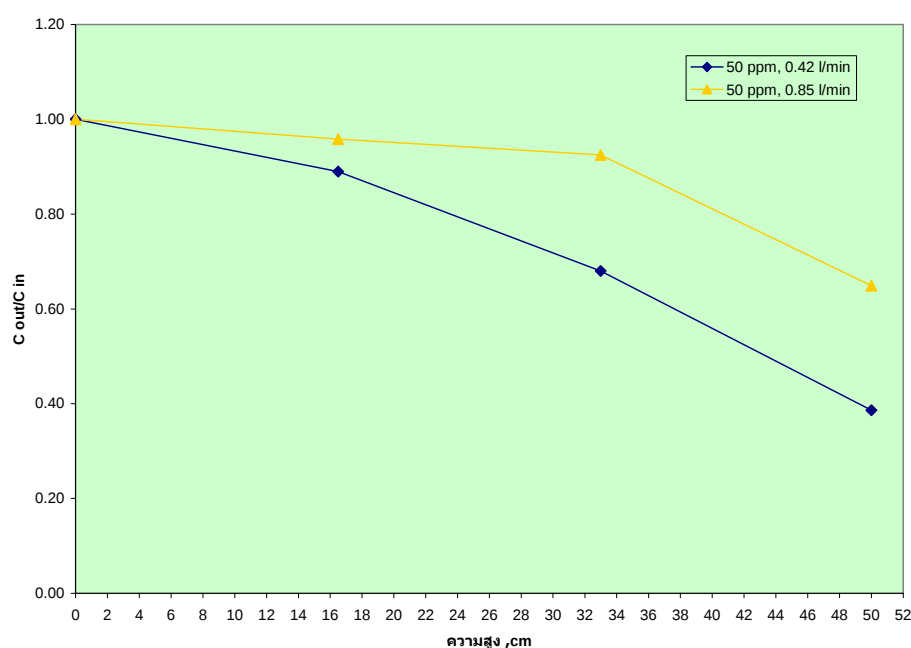
จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ 50 พีพีเอ็ม ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัด 61.38% ที่ค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเหลือเท่ากับ 35.10% ที่ค่า EBRT ลดลงเท่ากับ 1.19 นาที ส่วนที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัด 41.47% ที่ค่า EBRT เท่ากับ 2.41 นาที จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเหลือเพียง 19.33% ที่ค่า EBTR ลดลงเท่ากับ 1.19 นาที โดยรวมแล้วประสิทธิภาพจะลดลงตามค่า EBRT ที่ลดลงตามด้วย

สาเหตุที่ประสิทธิภาพของการกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยตัวกลางเกลบนี้อยู่ในระดับที่ต่ำอาจเนื่องมาจากปริมาณของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเบนซีนในอากาศที่อยู่ในบนตัวกลางชนิดนี้ในระบบกรองชีวภาพอาจมีอยู่น้อย ส่วนสาเหตุที่จุลินทรีย์มีอยู่น้อยหรือเจริญเติบโตช้าเนื่องจากตัววัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางชนิดนี้มีสารอาหารที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่น้อยมาก จึงทำให้การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีอยู่อย่างจำกัด (Ramirez *et al.*, 2003)

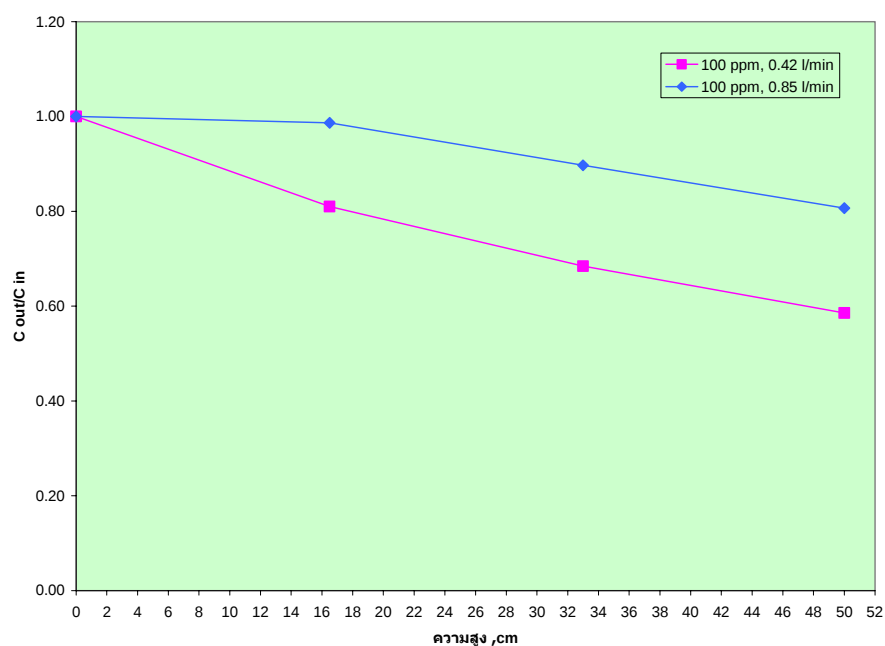
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนในระบบ ต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบ

เมื่อนำผลการตรวจวัดปริมาณเบนซีนในอากาศที่เข้าระบบและออกจากระบบกรองชีวภาพมาคำนวณและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนเข้าระบบต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบที่สภาวะการทดลองต่างๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 17, ภาพที่ 18

จากภาพที่ 17 และภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่าระดับความสูงของคอลัมน์มีผลต่อระดับความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศที่ผ่านคอลัมน์ด้วยเนื่องจากระยะเวลาที่อากาศอยู่ในคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นตามลำดับความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่าประสิทธิภาพก็จะเพิ่มตามด้วยเช่นกัน (Devinny *et al.*, 1999)



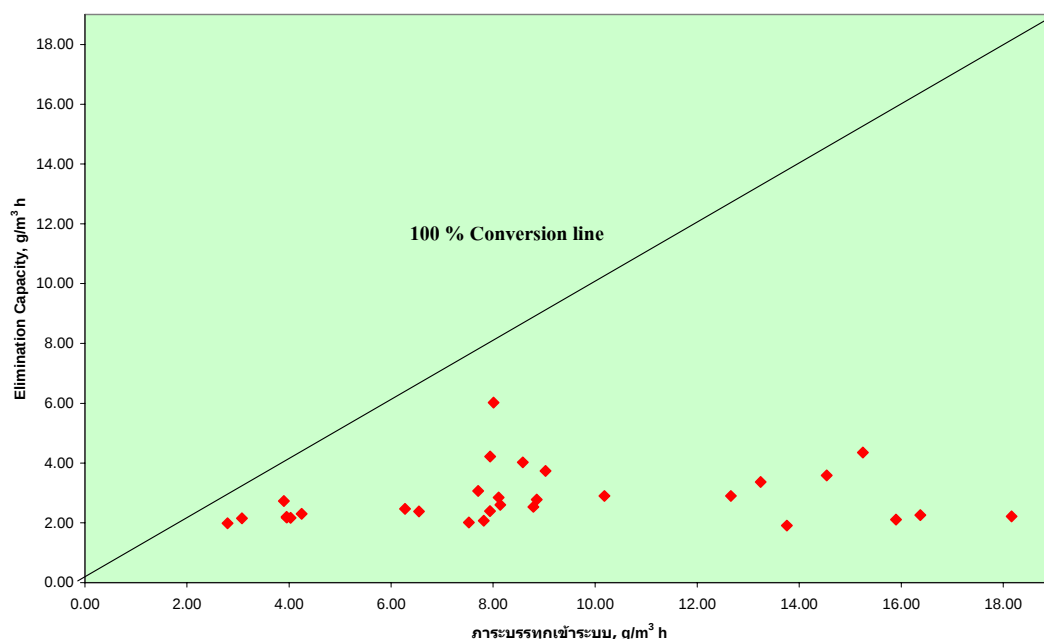
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนเข้าระบบ
50 พีพีเอ็ม ต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบด้วยตัวกลางเกล็ด



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของคอลัมน์กับอัตราส่วนความเข้มข้นเบนซีนเข้าระบบ 100 พีพีเอ็ม ต่อความเข้มข้นเบนซีนออกจากระบบด้วยตัวกลางแลกเปลี่ยน

2.3 ความสัมพันธ์ค่าภาระบรรทุกของระบบ (Loading) กับ ความสามารถในการกำจัดเบนซีน (Elimination Capacity: EC) ในอากาศด้วยระบบกรองชีวภาพ

ผลการหาความสัมพันธ์ค่าภาระบรรทุกของระบบ (Loading) กับ ความสามารถในการกำจัดเบนซีน (Elimination Capacity: EC) ในอากาศด้วยระบบกรองชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระมลพิษของระบบกับความสามารถกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยตัวกลางแลกเปลี่ยน

จากภาพที่ 19 แสดงถึงความสัมพันธ์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระมลพิษของระบบกับความสามารถกำจัดเบนซีนในอากาศด้วยตัวกลางแลกเปลี่ยน ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสามารถในการกำจัดค่อนข้างต่ำตลอดและไม่คงที่ในขณะที่ระดับภาระมลพิษเพิ่มขึ้น ซึ่งจะต่างกับลักษณะความสัมพันธ์ของตัวกลางที่เป็นเปลือกถั่วลิสง เนื่องจากประสิทธิภาพในการกำจัดของตัวกลางแลกเปลี่ยนค่อนข้างต่ำและไม่คงที่

2.4 ผลของพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมและติดตามการทำงานของระบบ

จากการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

2.4.1 ความชื้น

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการวัดค่าความชื้นในอากาศก่อนเข้าระบบโดยจะพยายามควบคุมความชื้นในอากาศก่อนเข้าระบบให้อยู่ที่ประมาณ 95 - 99 % เพื่อที่จะรักษาความชื้นภายในคอลัมน์กรองชีวภาพ และจะทำการรดน้ำที่ด้านบนของคอลัมน์เพื่อช่วยรักษาระดับความชื้นภายในคอลัมน์อีกส่วนหนึ่ง ผลการตรวจวัดความชื้นของอากาศก่อนเข้าระบบมีค่าเฉลี่ยในแต่ละ

สภาวะการทดลองอยู่ในช่วงตั้งแต่ 97.36% - 99.99% ดังแสดงไว้ใน ตารางผนวกที่ 17 – ตารางผนวกที่ 20

2.4.2 ค่า pH

จากผลการตรวจวัดค่า pH ในระหว่างการเดินระบบที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 50 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 และจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6 ทั้งจุดที่ 2 และจุดที่ 3 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 100 พีพีเอ็ม ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 และจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 6 ทั้งจุดที่ 2 และจุดที่ 3 ตามลำดับ ดังแสดงผลการวัดค่า pH ไว้ในตารางผนวกที่ 17 – ตารางผนวกที่ 20

จากผลการตรวจวัดค่า pH นี้แสดงให้เห็นว่า ค่า pH ที่ได้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ซึ่งเหมาะสมกับการทำงานของระบบกรองชีวภาพ

2.4.3 อุณหภูมิ

จากผลการตรวจวัดอุณหภูมิ ในระหว่างการเดินระบบที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 50 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศเข้าระบบ, จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 , จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และจุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ได้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่สภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 29.2, 29.4, 29.4 และ 29.5 องศาเซลเซียส และที่สภาวะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 29.9, 29.9, 30.3 และ 30.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศก่อนเข้าระบบประมาณ 100 พีพีเอ็ม ณ จุดที่อากาศเข้าระบบ, จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ,จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และจุดที่อากาศออกจากคอลัมน์ ได้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่สภาวะการทดลองที่ 1 เท่ากับ 29.2, 29.2, 29.4 และ 29.5 องศาเซลเซียส และ ที่สภาวะการทดลองที่ 2 เท่ากับ 29.4, 29.6, 29.9 และ 30.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางผนวกที่ 17 – ตารางผนวกที่ 20

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนในระบบกรองชีวภาพด้วยตัวกลางกรองเปลือกถั่วลิสงที่ความเข้มข้นของเบนซีนเข้าระบบประมาณ 50 พีพีเอ็ม พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนในอากาศเท่ากับ 100% ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่ และ 0.85 ลิตร/นาที่ (EBRT เท่ากับ 2.4129 นาที่ และ 1.1923 นาที่) จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเหลือเท่ากับ 69.22% ที่อัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.27 ลิตร/นาที่ (EBRT เท่ากับ 0.7980 นาที่) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างดี ส่วนที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 95.45 %, 60.63 % และ 49.66% ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่, 0.85 ลิตร/นาที่ และ 1.27 ลิตร/นาที่ ตามลำดับ (EBRT เท่ากับ 2.4129 นาที่, 1.1923 นาที่ และ 0.7980 นาที่) และระดับของความเข้มข้นของเบนซีนจะลดตามความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการตรวจวัดเบนซีนในอากาศตามระดับความสูงที่ 16.5 เซนติเมตร และ 33.0 เซนติเมตร จากฐานตัวกลางกรองชีวภาพ จากการติดตามตรวจวัดพารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการควบคุมและติดตามการทำงานของระบบกรองชีวภาพพบว่า ระดับความชื้นในอากาศเฉลี่ยที่เข้าระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 97.41% - 99.9% ค่า pH เฉลี่ยของตัวกลางกรองชีวภาพเท่ากับ 6 และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 29.3 – 30.5 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการตรวจวัดพารามิเตอร์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการทำงานของระบบ

2. จากผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดเบนซีนในระบบกรองชีวภาพด้วยตัวกลางกรองแกลบ ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเข้าระบบประมาณ 50 พีพีเอ็ม พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนในอากาศเท่ากับ 61.38% ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่ (EBRT เท่ากับ 2.4129 นาที่) จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเหลือเท่ากับ 35.10% ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาที่ (ค่า EBRT เท่ากับ 1.1923 นาที่) ส่วนที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัด 41.47% ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่ (EBRT เท่ากับ 2.4129 นาที่) จากนั้นประสิทธิภาพจะลดลงเหลือเพียง 19.33% ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาที่ (EBRT เท่ากับ 1.1923 นาที่) และระดับของความเข้มข้นของเบนซีนจะลดตามความสูงของคอลัมน์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการตรวจวัดเบนซีนในอากาศตามระดับความสูงที่ 16.5 เซนติเมตร และ 33.0 เซนติเมตร จากฐานตัวกลางกรองชีวภาพ จากการติดตามตรวจวัด

พารามิเตอร์อื่นที่ใช้ในการควบคุมและติดตามการทำงานของระบบกรองชีวภาพพบว่า ระดับความชื้นในอากาศเฉลี่ยที่เข้าระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 97.36% - 99.9% ค่า pH เฉลี่ยของตัวกลางกรองชีวภาพเท่ากับ 6 และอุณหภูมิเฉลี่ยภายในระบบอยู่ในช่วงตั้งแต่ 29.2 - 30.0 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการตรวจวัดพารามิเตอร์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการทำงานของระบบ

3. จากผลการผลการทดลองการบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนเบนซีนในอากาศโดยระบบกรองชีวภาพด้วยตัวกลางกรองเปลือกถั่วลิสงจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนในอากาศได้ดีที่สุด (100%) ที่ความเข้มข้นประมาณ 50 พีพีเอ็ม เมื่อมีค่าอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาติ และ 0.85 ลิตร/นาติ (EBRT เท่ากับ 2.4129 นาติ และ 1.1923 นาติ) ค่าภาระบรรทุกเฉลี่ยเท่ากับ 3.57 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง และ 7.20 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ตามลำดับ ค่าความสามารถในการกำจัดเบนซีน (EC) เท่ากับ 3.57 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง และ 7.20 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนการบำบัดอากาศที่ปนเปื้อนเบนซีนในอากาศในระบบกรองชีวภาพด้วยตัวกลางกรองแกลบจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนในอากาศได้ดีที่สุด (61.38%) ที่ความเข้มข้นประมาณ 50 พีพีเอ็ม เมื่อมีค่าอัตราการไหลของอากาศเข้าระบบเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาติ (EBRT เท่ากับ 2.4129 นาติ) ค่าภาระบรรทุกเฉลี่ยเท่ากับ 3.71 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง ค่าความสามารถในการกำจัดเบนซีน (EC) เท่ากับ 2.24 กรัม/ลูกบาศก์เมตร-ชั่วโมง

ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองที่เลือกใช้วัสดุที่เป็นไอรยะเหยและมีความเป็นพิษสูง เช่น เบนซีน ดังในการทำวิจัยเช่นนี้ ควรที่จะมีอุปกรณ์ป้องกันที่ตัวบุคคลที่ทำการวิจัย เช่น หน้ากากช่วยหายใจแบบมีให้กรองไอสารเคมี เพื่อไม่ให้ผู้วิจัยรับสารมลพิษนั้นโดยตรง ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายของผู้วิจัยได้

2. ในการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศเข้าระบบเป็นไปได้ยากจากแหล่งกำเนิดเบนซีนที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ซึ่งในขณะที่ทำการวิจัยจะต้องคอยตรวจเช็คระดับความเข้มข้นอยู่เป็นระยะๆ ดังนั้นในการทดลองครั้งต่อไปจึงควรที่จะออกแบบชุดแหล่งกำเนิดเบนซีนให้ดีกว่านี้เช่นควรที่จะมีระบบวาล์วที่ควบคุมอัตราการจ่ายและปล่อยอากาศที่ค่อนข้างคงที่ หรืออาจจะใช้แหล่งกำเนิดเบนซีนที่เป็นก๊าซมาตรฐานก็ได้ แต่การใช้ก๊าซมาตรฐานนี้ก็จะมีความแพง

3. ในการทดลองครั้งต่อไปที่จะใช้ตัวกลางกรองชีวภาพที่มีสารอาหารที่เป็นปัจจัยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายเบนซีนอยู่น้อยเช่นตัวกลางกลบที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ ในขณะที่ทำการทดลองควรที่จะมีการเติมสารอาหารลงไปในตัวกลางกรองเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้ดีขึ้นและคงที่ขึ้น

4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับชนิดและจำนวนของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบกรองชีวภาพเพื่อใช้เป็นข้อมูลเชิงลึกในการที่จะสามารถควบคุมระบบกรองชีวภาพให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. IPCS (The International Program on Chemical Safety). 1993. **Environmental Health 150: Benzene**. World Health Organization, Switzerland.

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Beyer H., and Walter W. 1996. **Handbook of Organic Chemistry Prentice**. Hall Europe, UK.

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Dasch J.M. and Williams R.L. 1991. Benzene exhaust emissions from in-use general motors vehicles. **Environ Sci Technol** 1991 (25): 853 - 857.

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Lofroth G. Burton R.M., Forehand L., Hammond S.K., Seila R.L., Zweidinger R.B., and Lewtas J. 1989. Characterization of environmental tobacco smoke. **Environ Sci Technol** 1989 (23): 610 - 614.

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Colenutt B.A., and Thornburn S. 1980. Gas-chromatographic analysis of trace hydrocarbon on pollutants in water samples. **Int/J Environ Study** 1980 (15): 25 - 32.

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Howard P.H., Boethling R.S., Jarvis W.F, Meylan W. M., and Michaelenko E.M.. 1991. **Handbook of Environmental Degradation Rates**. Lewis Publishers, Inc., Michigan USA.

- กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Vaishnav D.D., and Babeu L. 1987. Comparison of occurrence and rates of chemical biodegradation in natural waters. **Bull Environ Contam Toxicol** 1987 (39): 237 - 244.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2542. **เบนซีน**. บริษัท ศรีเมืองการพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพฯ. อ้างอิง. Gibson D.T., Koch J.R., and Kallio R.E. 1968. Oxidative degradation of aromatic hydrocarbons by microorganisms. I: Enzymatic formation of catechol from benzene. **Biochemistry** 1968 (7): 2653-2662.
- อาทิตย์ รั้งยี่สันติวานนท์, สมใจ ขจรชีพพันธุ์งา และ ประสาท โพธิ์นัมแดง. 2547. การกำจัดเบนซีน โดยกระบวนการไบโอฟิลเตรชัน. **วารสารวิจัย มข. (บศ.) 4** 2547 (ฉบับพิเศษ): 186 - 195.
- Abumaizar Riyad J., Walter Kocher and Edward H. Smith. 1998. Biofiltration of BTEX contaminated air streams using compost-activated carbon filter media. **Journal of Hazardous Materials** 1998 (60): 111 - 126.
- Devinny Joseph S., Marc A. Deshusses and Todd S. Webster. 1999. **Biofiltration for Air Pollution Control**. Lenis Publishes, USA.
- Namkoong Wan, Joon-Seok Park and Jean S. VanderGheynst. 2003. Biofiltration of gasoline vapor by compost media. **Environmental Pollution** 2003 (121): 181-187.
- Ramirez-Lopez E., J. Corona-Hernandez, L. Dendooven, P. Rangel and F. Thalasso. 2003. Characterization of five agricultural by-products as potential biofiltration carriers. **Bioresource technology** 2003 (88): 259 - 263.
- Sene L., A. Converti, M.G.A. Felipe and M. Zilli. 2002. Sugarcane bagasse as alternative packing material for biofiltration of benzene polluted gaseous streams: a preliminary study. **Bioresource technology** (83): 153 - 157.

Swanson Warren J. and Raymond C. Loehr. 1997. Biofiltration, Design and Operations principles, and Applications. **Sournal of Environmental Engineering** 1997 (18):6 - 9.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางข้อมูลผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ก1 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีน
ด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 50 พีพีเอ็ม
อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาท

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาท)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
0	0.42	21.77	20.16	19.99	19.64	7.39	8.19	9.77
3	0.42	30.28	24.64	15.46	10.24	18.64	48.94	66.18
6	0.42	35.00	28.65	18.35	9.61	18.15	47.55	72.53
9	0.42	30.80	24.67	14.66	5.82	19.90	52.40	81.10
12	0.42	32.08	24.13	10.54	1.32	24.78	67.14	95.89
15	0.42	35.99	11.97	1.84	ND	66.74	94.89	100.00
18	0.42	37.35	10.65	2.10	ND	71.49	94.37	100.00
21	0.42	45.12	12.66	1.24	ND	71.94	97.25	100.00
24	0.42	48.24	13.74	2.01	ND	71.52	95.83	100.00
27	0.42	49.24	14.21	2.10	ND	71.14	95.74	100.00
30	0.42	50.13	13.43	2.03	ND	73.21	95.94	100.00
33	0.42	47.87	12.55	1.33	ND	73.78	97.22	100.00

หมายเหตุ ND = Non Detectable

ตารางผนวกที่ ก2 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางเปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 50 พีพีเอ็ม อัตราการ
ไหลอากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาทีก

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
36	0.85	55.19	40.97	18.62	0.00	25.77	66.26	100.00
39	0.85	52.48	38.46	17.82	0.00	26.71	66.04	100.00
41	0.85	36.97	26.66	11.79	0.00	27.89	68.11	100.00
44	0.85	46.87	33.41	14.32	0.00	28.72	69.46	100.00
49	0.85	51.24	35.47	15.98	0.00	30.77	68.82	100.00
54	0.85	54.56	38.46	16.65	0.00	29.51	69.49	100.00
59	0.85	45.74	31.46	12.84	0.00	31.22	71.93	100.00
64	0.85	49.99	33.43	13.85	0.00	33.13	72.30	100.00

ตารางผนวกที่ ก3 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางเปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 50 พีพีเอ็ม อัตราการ
ไหลอากาศเท่ากับ 1.27 ลิตร/นาทีก

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
69	1.27	50.22	43.09	31.59	16.07	14.20	37.11	67.99
74	1.27	46.46	38.22	28.98	15.49	17.72	37.62	66.66
79	1.27	47.64	39.09	29.09	14.77	17.95	38.94	69.01
84	1.27	47.74	38.48	28.77	13.88	19.40	39.73	70.92
89	1.27	45.89	36.12	26.75	13.65	21.29	41.72	70.26
94	1.27	44.22	35.00	26.15	13.05	20.84	40.87	70.50

ตารางผนวกที่ ก4 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางเปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม อัตราการ
ไหลอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที

ระยะ เวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาที)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
0	0.42	60.80	58.47	56.12	54.98	3.83	7.69	9.57
3	0.42	65.46	55.21	52.49	50.89	15.65	19.81	22.26
6	0.42	81.71	60.49	57.46	39.43	25.97	29.68	51.75
9	0.42	85.46	54.91	51.68	19.88	35.74	39.52	76.74
12	0.42	94.88	52.46	32.16	2.47	44.71	66.11	97.40
15	0.42	105.97	56.74	20.03	1.87	46.46	81.10	98.24
18	0.42	98.76	53.32	19.49	1.43	46.01	80.27	98.55
21	0.42	97.46	52.75	18.22	1.34	45.88	81.30	98.63
24	0.42	94.37	50.96	16.00	1.33	46.00	83.04	98.59
27	0.42	110.46	58.76	21.04	7.47	46.80	80.95	93.24
30	0.42	104.61	55.65	17.11	6.50	46.81	83.65	93.79
33	0.42	113.94	61.29	19.65	14.66	46.21	82.75	87.13

ตารางผนวกที่ ก5 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาทีก

ระยะ เวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
36	0.85	85.00	73.65	49.21	33.32	13.36	42.10	60.80
39	0.85	93.84	79.65	51.14	35.67	15.12	45.51	61.98
41	0.85	98.85	84.10	55.35	37.36	14.92	44.01	62.20
44	0.85	79.96	67.98	40.97	30.46	14.97	48.76	61.90
49	0.85	95.48	80.95	50.47	33.65	15.22	47.14	64.76
54	0.85	99.79	85.32	50.12	42.32	14.50	49.77	57.60
59	0.85	118.05	99.93	59.67	51.35	15.35	49.45	56.50
64	0.85	103.91	87.65	54.22	42.32	15.65	47.82	59.28

ตารางผนวกที่ ก6 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วยตัวกลางเปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 1.27 ลิตร/นาทีก

ระยะ เวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
69	1.27	97.16	93.98	75.65	51.84	3.28	22.14	46.64
74	1.27	106.85	101.65	80.21	55.47	4.86	24.93	48.09
79	1.27	108.90	103.00	81.32	54.16	5.42	25.33	50.27
84	1.27	108.35	102.64	80.21	53.49	5.27	25.97	50.63
89	1.27	98.97	93.29	74.01	48.22	5.75	25.22	51.28
94	1.27	104.66	98.24	78.02	51.24	6.14	25.45	51.04

ตารางผนวกที่ ก7 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเปลือก
ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.42 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	0	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.1	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.5	30.0	-
2	3	1	0.01	99.9	29.7	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.3	30.0	-
3	6	1	0.01	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	31.0	6
		4	-	95.6	31.0	-
4	9	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94.3	30.5	-
5	12	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.4	30.0	-
6	15	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.7	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก7 (ต่อ) ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลาง
เปลือก ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหล
อากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	18	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.8	30.0	-
8	21	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.5	30.0	-
9	24	1	0.01	99.6	29.1	-
		2	-	-	29.3	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.3	29.5	-
10	27	1	0.01	99.6	29.3	-
		2	-	-	29.3	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.6	29.5	-
11	30	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.4	29.5	-
12	33	1	0.01	99.9	29.1	-
		2	-	-	29.2	6
		3	-	-	29.2	6
		4	-	98.4	29.5	-

ตารางผนวกที่ ๘ ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเปลือก
ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.85 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	36	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.1	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.5	30.0	-
2	39	1	0.02	99.9	29.7	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.3	30.0	-
3	41	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	31.0	6
		4	-	95.6	31.0	-
4	44	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94.3	30.5	-
5	49	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.4	30.0	-
6	54	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.7	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก8 (ต่อ) ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลาง
เปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหล
อากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	59	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.8	30.0	-
8	64	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.5	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก9 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเปลือก
ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
1.27 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	69	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	96.8	30.5	-
2	74	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.7	30.5	-
3	79	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	95.6	30.5	-
4	84	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	92.3	30.0	-
5	89	1	0.03	99.9	30.5	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94.3	30.5	-
6	94	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.8	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก10 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเปลือก
ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่า
กับ 0.42 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	0	1	0.01	92.5	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	83.5	29.0	-
2	3	1	0.01	93.5	29.5	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	82.3	30.0	-
3	6	1	0.01	91.5	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	83.5	29.5	-
4	9	1	0.01	93	29.5	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	84.5	29.5	-
5	12	1	0.01	99.9	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	93.6	29.0	-
6	15	1	0.01	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.6	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ) ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลาง
เปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการ
ไหลอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	18	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.5	29.5	-
8	21	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.0	29.5	-
9	24	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.0	29.5	-
10	27	1	0.01	99.6	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.3	29.5	-
11	30	1	0.01	99.9	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	93.5	30.0	-
12	33	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.2	6
		3	-	-	29.2	6
		4	-	95.5	29.5	-

ตารางผนวกที่ ก11 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเปลือก
ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่า
กับ 0.85 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	36	1	0.02	99.7	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.0	-
2	39	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.3	30.0	-
3	41	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.6	30.0	-
4	44	1	0.02	99.5	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	83.5	30.0	-
5	49	1	0.02	99.9	29.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.6	30.0	-
6	54	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ) ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลาง
เปลือกถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการ
ไหลอากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาที

ลำดับ ที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัว อย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	59	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.5	30.0	-
8	64	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.0	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก12 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเปลือก
ถั่วลิสง ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่า
กับ 1.27 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	69	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94	30.5	-
2	74	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	95.0	30.5	-
3	79	1	0.03	99.9	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	96	30.5	-
4	84	1	0.03	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	93.5	30.5	-
5	89	1	0.03	99.9	30.5	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94.6	30.5	-
6	94	1	0.03	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.5	-

ตารางผนวกที่ ก13 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางแลกเปลี่ยน ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหล
อากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาฬิกา

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาฬิกา)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
0	0.42	25.38	24.51	20.31	18.03	3.40	19.97	28.95
3	0.42	33.30	30.15	25.32	19.22	9.44	23.97	42.27
6	0.42	41.34	36.01	28.65	12.96	12.88	30.70	68.65
9	0.42	40.23	35.47	29.65	14.00	11.83	26.29	65.20
12	0.42	39.63	34.86	29.76	15.11	12.04	24.90	61.86
15	0.42	35.13	30.54	23.32	10.15	13.07	33.63	71.12
18	0.42	38.65	33.69	25.65	11.65	12.83	33.64	69.86
21	0.42	48.98	42.32	30.32	14.69	13.60	38.10	70.01
24	0.42	53.37	48.21	36.65	24.41	9.67	31.33	54.26
27	0.42	50.65	45.98	35.65	23.36	9.22	29.62	53.87
30	0.42	49.69	44.91	34.95	22.38	9.61	29.67	54.95
33	0.42	49.65	44.97	35.65	22.04	9.42	28.19	55.60

ตารางผนวกที่ ก14 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางแลกเปลี่ยน ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหล
อากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาทีก

ระยะเวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
36	0.85	53.29	50.03	48.65	28.32	6.11	8.71	46.86
39	0.85	56.06	52.32	51.24	32.84	6.68	8.60	41.42
41	0.85	38.97	36.97	35.97	23.65	5.12	7.70	39.31
44	0.85	40.66	38.85	37.04	25.87	4.44	8.90	36.37
49	0.85	50.35	48.23	45.92	32.64	4.20	8.79	35.17
54	0.85	63.22	61.29	57.82	45.22	3.06	8.54	28.48
59	0.85	46.74	45.90	44.52	34.26	1.80	4.74	26.70
64	0.85	48.55	47.59	46.59	35.68	1.97	4.03	26.50

ตารางผนวกที่ ก15 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางแลกเปลี่ยน ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหล
อากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาทีก

ระยะ เวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาทีก)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
0	0.42	65.65	64.65	63.05	62.60	1.52	3.95	4.64
3	0.42	64.32	55.65	34.65	14.29	13.48	46.13	77.78
6	0.42	93.87	74.91	39.65	15.60	20.20	57.76	83.39
9	0.42	84.97	71.94	39.48	23.65	15.34	53.54	72.17
12	0.42	114.73	93.65	36.49	25.48	18.38	68.20	77.79
15	0.42	100.65	80.65	34.65	24.97	19.87	65.58	75.19
18	0.42	99.82	79.13	72.31	46.84	20.73	27.56	53.08
21	0.42	96.85	78.65	71.14	58.32	18.79	26.55	39.78
24	0.42	102.31	81.35	76.19	69.63	20.49	25.53	31.95
27	0.42	110.46	87.65	82.57	78.65	20.65	25.25	28.80
30	0.42	99.75	83.65	75.11	69.68	16.14	24.69	30.14
33	0.42	111.28	93.06	82.65	76.38	16.37	25.73	31.36

ตารางผนวกที่ ก16 ความเข้มข้นของเบนซีนในอากาศ และประสิทธิภาพในการกำจัดเบนซีนด้วย
ตัวกลางแลกเปลี่ยน ที่ความเข้มข้นของเบนซีนประมาณ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหล
อากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาฬิกา

ระยะ เวลา (วัน)	อัตราการไหลอากาศ (ลิตร/นาฬิกา)	ความเข้มข้นเบนซีน (พีพีเอ็ม)				% Removal Efficiency		
		จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4
36	0.85	82.26	81.06	70.65	61.35	1.45	14.11	25.41
39	0.85	94.68	93.03	80.65	67.65	1.74	14.82	28.55
41	0.85	90.29	89.66	78.25	68.02	0.70	13.34	24.66
44	0.85	78.64	78.05	67.96	60.62	0.75	13.58	22.91
49	0.85	98.73	97.65	90.47	85.65	1.10	8.37	13.25
54	0.85	85.42	83.97	80.25	73.58	1.70	6.06	13.86
59	0.85	112.80	111.00	105.64	99.04	1.60	6.35	12.20
64	0.85	101.68	100.06	95.65	87.65	1.59	5.94	13.80

ตารางผนวกที่ ก17 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางแกลบ ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.42 ลิตร/นาที่

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	0	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.1	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.5	30.0	-
2	3	1	0.01	99.9	29.7	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.3	30.0	-
3	6	1	0.01	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	31.0	6
		4	-	95.6	31.0	-
4	9	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.5	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94.3	30.5	-
5	12	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.4	30.0	-
6	15	1	0.01	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.7	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก17 (ต่อ) ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเกลบ
ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.42 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	18	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	96.8	29.5	-
8	21	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.64	29.5	-
9	24	1	0.01	99.6	29.1	-
		2	-	-	29.3	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.3	29.5	-
10	27	1	0.01	99.6	29.3	-
		2	-	-	29.3	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.6	29.5	-
11	30	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.4	29.5	-
12	33	1	0.01	99.9	29.1	-
		2	-	-	29.2	6
		3	-	-	29.2	6
		4	-	98.4	29.5	-

ตารางผนวกที่ ก18 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางแกลบ ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 0.85 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	36	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.0	-
2	39	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94	30.0	-
3	41	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	31.0	6
		4	-	95.5	31.0	-
4	44	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	93.3	30.5	-
5	49	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.4	30.0	-
6	54	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.7	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก18 (ต่อ) ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางเกลบ
ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 50 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.85 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	59	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.5	6
		4	-	94.0	30.5	-
8	64	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางแลกเปลี่ยน
ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.42 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	0	1	0.01	91.0	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	84.0	29.0	-
2	3	1	0.01	93.0	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	83.3	29.5	-
3	6	1	0.01	91.5	29.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	85.5	29.5	-
4	9	1	0.01	94	29.5	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	83.4	29.5	-
5	12	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.3	29.5	-
6	15	1	0.01	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.0	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก19 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางแลกเปลี่ยน
ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.42 ลิตร/นาที่ (ต่อ)

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	18	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.5	30.0	-
8	21	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	94.0	30.0	-
9	24	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	93.5	29.5	-
10	27	1	0.01	99.5	29.5	-
		2	-	-	29.3	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	93.5	30.0	-
11	30	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.0	6
		3	-	-	29.0	6
		4	-	95.0	29.0	-
12	33	1	0.01	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.2	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	95.5	29.5	-

ตารางผนวกที่ ก20 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางแลกเปลี่ยน
ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.85 ลิตร/นาที

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
1	36	1	0.02	99.9	29.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.0	-
2	39	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	96.4	30.0	-
3	41	1	0.02	99.9	29.5	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	92.3	30.0	-
4	44	1	0.02	99.5	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	82.5	30.0	-
5	49	1	0.02	99.9	29.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	29.5	6
		4	-	92.3	30.0	-
6	54	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.6	30.0	-

ตารางผนวกที่ ก20 ผลการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบกรองชีวภาพตัวกลางแลกเปลี่ยน
ที่ความเข้มข้นของเบนซีนเท่ากับ 100 พีพีเอ็ม อัตราการไหลอากาศเท่ากับ
0.85 ลิตร/นาที (ต่อ)

ลำดับที่	ระยะเวลา	ตำแหน่งเก็บตัวอย่าง	ความเร็วลม (m/s)	% ความชื้น	อุณหภูมิ (°C)	pH
7	59	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	29.5	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	95.5	30.0	-
8	64	1	0.02	99.9	30.0	-
		2	-	-	30.0	6
		3	-	-	30.0	6
		4	-	94.5	30.0	-

ภาคผนวก ข

ภาพอุปกรณ์เครื่องมือและการทดลอง



ภาพผนวกที่ ข1 เปลือกถั่วลิสง (ซ้าย) และแกลบ (ขวา)



ภาพผนวกที่ ข2 ชุดทดลองระบบกรองชีวภาพ



ภาพผนวกที่ ข3 การเก็บตัวอย่างอากาศ



ภาพผนวกที่ ข4 การตรวจวัดพารามิเตอร์ควบคุมต่างๆ



ภาพผนวกที่ ๖ เครื่อง Gas Chromatograph

ภาคผนวก ค

ลักษณะและคุณสมบัติทั่วไปของเบนซีน

การบ่งลักษณะ (Identification)

ชื่อสามัญ: Benzene

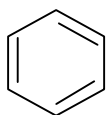
CASRN (Chemical Abstracts Service Registr Number): 71-43-2

ชื่อเคมี: Benzene

ชื่อพ้อง: (6)Annulene	Benzeen (Dutch)
Benzen (Polish)	Benzene (ACGIH:OSHA)
Benzin	Benzine
Benzol (OSHA)	Benzole
Benzolene	Benzolo (Italian)
Bicarburet of hydrogen	Carbon oil
Coal naphtha	Cyclohexatriene
Fenzen (Czech)	Mineral naphtha
NCI-C55276	Phene
Phenyl hydride	Pyrobenzol
Pyrobenzole	RCRA waste number U019

สูตรโมเลกุล: C_6H_6 (C 92.55%, H 7.75%)

สูตรโครงสร้าง:



น้ำหนักโมเลกุล: 78.11

Conversion factor: Benzene ในสถานะที่เป็นไอ

1 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร = 0.31 พีพีเอ็ม (ppm) หรือ

1 พีพีเอ็ม = 3.2 มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ (Chemical and physical properties)

เบนซีน เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นฉุนเฉพาะตัว ระเหยได้ง่าย ติดไฟได้ คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเบนซีน มีดังต่อไปนี้

จุดเยือกแข็ง	5.5 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	80.1 องศาเซลเซียส
จุดวาบไฟ	- 11 องศาเซลเซียส (Closed cup)
อุณหภูมิติดไฟได้เอง	632.5 องศาเซลเซียส
ช่วงความเข้มข้นติดไฟได้	1.3 - 7.1 % (ในอากาศ)
ความดันไอ (ที่ 25 องศาเซลเซียส)	90.76 มิลลิเมตรปรอท
ความหนาแน่นไอ	2.7 (อากาศ = 1)
การละลายน้ำ	1.718 กรัม/ลิตร (ที่ 25 องศาเซลเซียส) 1.75 กรัม/ลิตร (ที่ 26.1 องศาเซลเซียส)
ความถ่วงจำเพาะ	0.8787 (ที่ 15 องศาเซลเซียส) 0.8765 (ที่ 20 องศาเซลเซียส)
ดัชนีหักเหแสง	1.50108 (ที่ 20 องศาเซลเซียส)
Henry's law constant ($\text{atm m}^3 \text{mole}^{-1}$)	
25 องศาเซลเซียส	5.28×10^{-3}
30 องศาเซลเซียส	6.76×10^{-3}
40 องศาเซลเซียส	5.55×10^{-3}
45 องศาเซลเซียส	1.22×10^{-3}
50 องศาเซลเซียส	1.43×10^{-3}
n-octanol-water partition coefficient, K_{ow}	
23 องศาเซลเซียส	1.32×10^2

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายเกริก วงศ์สอนธรรม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 สิงหาคม 2523
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์ ระดับ 3
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	คณะทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-