การศึกษาเปรียบเทียบการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนทางชีวภาพโดยใช้โทลูอีน ฟีนอล และเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตเพื่อการเจริญเติบโต

นางสาวนภาพร กิตติศิริ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2547
ISBN 974-17-6807-9
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A COMPARISON STUDY OF BIOLOGICAL COMETABOLISM OF TRICHLOROETHYLENE USING TOLUENE, PHENOL, AND BENZYL ALCOHOL AS GROWTH SUBSTRATES

Miss Napaporn Kittisiri

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2004

ISBN 974-17-6807-9

กิตติกรรมประกาศ

คุณงามความดีที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดามารดา และทุก ๆ คนในครอบครัว ที่อบรมเลี้ยงดู ให้การศึกษามาตั้งแต่เยาว์วัย ให้ความรักที่ยิ่งใหญ่และความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เป็นกำลังใจที่สำคัญที่สุดในระหว่างการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอดจนเสร็จสมบูรณ์ในที่สุด

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน เป็นอย่างสูง ที่เมตตาและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ยังให้ความกรุณาถ่ายทอดวิชาความรู้ในด้านต่าง ๆ รวมทั้งให้แง่คิดในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพและแนะนำให้คำปรึกษาในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญเญาเมธีกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ เพื่อการแก้ไขและปรับปรุง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากที่สุด และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการให้แก่ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณคุณสมเกียรติ ท้วมแสง และคุณพิณนภา โรจนจิราภา เป็นอย่างสูงที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณ เจตต์ น้ำ และเจ้าหน้าที่ศูนย์อ้างอิงทางห้องปฏิบัติการและพิษวิทยา สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์จันทรวรรณ ตันเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

ท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โอห์ม เพื่อนที่ร่วมทุกข์ร่วมสุขระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณน้ำหวาน เดียร์ เบ็นซ์ หญิง เอ แอน เพื่อนที่น่ารักที่คอยรับฟังปัญหา ให้กำลังใจและเอาใจช่วยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเปรียบเทียบการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนทางชีวภาพโดยใช้โทลูอีน ฟีนอล และเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตเพื่อการเจริญเติบโต
โดย	นางสาวนภาพร กิตติศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ พึ่งรัศมี)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นภาพร กิตติศิริ : การศึกษาเปรียบเทียบการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนทางชีวภาพโดยใช้ โทลูอีน ฟีนอล และเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตเพื่อการเจริญเติบโต
(A COMPARISON STUDY OF BIOLOGICAL COMETABOLISM OF TRICHLOROETHYLENE USING TOLUENE, PHENOL, AND BENZYL ALCOHOL AS GROWTH SUBSTRATES) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน , 160 หน้า. ISBN 974-17-6807-9.

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตแทนโทลูอีนและฟีนอลในการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีนทางชีวภาพ โดยศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การเจริญเติบโต (Growth Yield : Y) และค่า TCE Transformation Yield (T_y) ของซับสเตรตทั้งสามชนิดในการทดลองแบบแบตช์ และทำการศึกษาหาค่าคิเนติกส์ของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่โตบนโทลูอีนมาใช้ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่าจุลินทรีย์ที่โตบนโทลูอีนสามารถใช้เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตแทนโทลูอีนและฟีนอลในการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีนได้

ค่า Y ของจุลินทรีย์ที่ใช้โทลูอีน ฟีนอล และเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.074 มิลลิกรัม-โทลูอีน/มิลลิกรัม-เซลล์ 0.056 มิลลิกรัม-ฟีนอล/มิลลิกรัม-เซลล์ และ 0.060 มิลลิกรัม-เบนซิลแอลกอฮอล์/มิลลิกรัม-เซลล์ ตามลำดับ ส่วนค่า T_y ของการใช้ซับสเตรตทั้งสามชนิดในการย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนมีค่าเท่ากับ 0.014 มิลลิกรัม-ทีซีอี/มิลลิกรัม-โทลูอีน 0.015 มิลลิกรัม-ทีซีอี/มิลลิกรัม-ฟีนอล และ 0.012 มิลลิกรัม-ทีซีอี/มิลลิกรัม-เบนซิลแอลกอฮอล์

เมื่อทำการประมาณค่าตัวแปรทางคิเนติกส์โดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ AQUASIM2.1b สำหรับการใช้โทลูอีนเป็นซับสเตรต ค่าอัตราการย่อยสลายซับสเตรต (k_g) เท่ากับ 4.01 มิลลิกรัม-โทลูอีน/มิลลิกรัม-เซลล์/วัน ค่าความเข้มข้นที่อัตราการย่อยสลายซับสเตรตเป็นครึ่งหนึ่ง (K_{sg}) เท่ากับ 1.29 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าอัตราการย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีน (k_c) เท่ากับ 1.67 มิลลิกรัม-ทีซีอี/มิลลิกรัม-เซลล์/วัน และค่าความเข้มข้นที่อัตราการย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนเป็นครึ่งหนึ่ง (K_{sc}) เท่ากับ 7.61 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับการใช้ฟีนอลเป็นซับสเตรต ค่า k_g เท่ากับ 5.27 มิลลิกรัม-ฟีนอล/มิลลิกรัม-เซลล์/วัน ค่า K_{sg} เท่ากับ 0.98 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า k_c เท่ากับ 1.39 มิลลิกรัม-ทีซีอี/มิลลิกรัม-เซลล์/วัน และค่า K_{sc} เท่ากับ 6.62 มิลลิกรัม/ลิตร และสำหรับการใช้เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรต ค่า k_g เท่ากับ 7.09 มิลลิกรัม-เบนซิลแอลกอฮอล์/มิลลิกรัม-เซลล์/วัน ค่า K_{sg} เท่ากับ 0.83 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า k_c เท่ากับ 1.46 มิลลิกรัม-ทีซีอี/มิลลิกรัม-เซลล์/วัน และค่า K_{sc} เท่ากับ 7.06 มิลลิกรัม/ลิตร

ผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรมในการบำบัดการปนเปื้อนของไตรคลอโรเอทธิลีนในชั้นน้ำใต้ดิน การวางแผนบำบัดและฟื้นฟูสามารถใช้โปรแกรมร่วมกับการทดลองแบบแบตช์เพื่อประมาณการปริมาณซับสเตรต เวลาที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลาย และประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....นภาพร กิตติศิริ.....
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2547

4570372521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: BIODEGRADATION / AEROBIC BIOTRANSFORMATION / BIOREMEDIATION

NAPAPORN KITTISIRI : A COMPARISON STUDY OF BIOLOGICAL COMETABOLISM OF TRICHLOROETHYLENE USING TOLUENE, PHENOL, AND BENZYL ALCOHOL AS GROWTH SUBSTRATES. THESIS ADVISOR : SARUN TEJASEN, Ph.D., 160 pp. ISBN 974-17-6807-9.

This research was focused on possibility of replacing toluene and phenol with benzyl alcohol as growth substrates in biological cometabolism of trichloroethylene (TCE). Growth Yield (Y) and TCE Transformation Yield (T_y) using toluene, phenol, and benzyl alcohol as growth substrates were studied in the batch experiments. Kinetic parameters of the cometabolism processes were estimated using a computer modeling.

This research started with microorganisms grown on toluene. Results showed that benzyl alcohol could be replaced for toluene and phenol as growth substrate in TCE biological cometabolism.

In this study, Growth Yields (Y) of toluene, phenol, and benzyl alcohol were 0.074 mg-toluene/mg-cells, 0.056 mg-phenol/mg-cells, and 0.060 mg-benzyl alcohol/mg-cells, respectively. TCE Transformation yields (T_y) using toluene, phenol, and benzyl alcohol as growth substrates were 0.014 mg-TCE/mg-toluene, 0.015 mg-TCE/mg-phenol, and 0.012 mg-TCE/mg-benzyl alcohol, respectively.

The kinetic parameters of trichloroethylene cometabolism were modeled by AQUASIM2.1b program. By using toluene as growth substrate, the maximum specific rate of substrate degradation (k_g) was 4.01 mg-toluene/mg-cell/day, the half saturation constant for the growth substrate (K_{sg}) was 1.29 mg/l, the maximum specific rate of trichloroethylene degradation (k_c) was 1.67 mg-TCE/mg-cell/day, and the half saturation constant for trichloroethylene (K_{sc}) was 7.61 mg/l. By using phenol as growth substrate, the k_g was 5.27 mg- phenol/mg-cell/day, the K_{sg} was 0.98 mg/l, the k_c was 1.39 mg-TCE/mg-cell/day, and the K_{sc} was 6.62 mg/l. And by of using benzyl alcohol as growth substrate, the k_g was 7.09 mg-benzyl alcohol/mg-cell/day, the K_{sg} was 0.83 mg/l, the k_c was 1.46 mg-TCE/mg-cell/day, and the K_{sc} was 7.06 mg/l.

This research can be engineering applicative in TCE-contaminated groundwater remediation. The modelings together with batch experiments are able to estimate growth substrate quantity, remediation period, and remediation cost.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Environmental Engineering Student's Signature Napaporn Kittisiri

Field of study Environmental Engineering Advisor's Signature Sarun Tejasen

Academic year 2004

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญตาราง.....ญ
สารบัญรูป.....ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 ไตรคลอโรเอทธิลีน.....4
2.1.1 การนำไปใช้ประโยชน์.....5
2.1.2 อันตรายต่อสุขภาพอนามัย.....5
2.1.3 การปนเปื้อนสู่งแวดล้อม.....6
2.2 วิธีการบำบัดสารประกอบคลอรีนไฮโดรคาร์บอนชนิดอะลิฟาติก.....7
2.1.1 ใช้เป็นซับสเตรตของจุลินทรีย์.....8
2.1.2 การแทนที่ฮาโลเจนอะตอมด้วยไฮโดรเจนอะตอมในสภาวะไร้ออกซิเจน.....8
2.1.3 กระบวนการร่วมย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน.....9
2.3 ซับสเตรตที่ใช้ในกระบวนการร่วมย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน.....10
2.3.1 โทลูอีน.....10
2.3.1.1 วิถีการย่อยสลายโทลูอีนทางชีวภาพ.....12
2.3.1.2 ข้อดีของการใช้โทลูอีนเป็นซับสเตรต.....13
2.3.1.3 ข้อเสียของการใช้โทลูอีนเป็นซับสเตรต.....14
2.3.2 ฟีนอล.....14
2.3.2.1 วิถีการย่อยสลายฟีนอลทางชีวภาพ.....15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.2 ข้อดีของการใช้ฟีนอลเป็นซับสเตรต.....16
2.3.2.3 ข้อเสียของการใช้ฟีนอลเป็นซับสเตรต.....16
2.3.3 เบนซิลแอลกอฮอล์.....17
2.3.3.1 วิถีการย่อยสลายเบนซิลแอลกอฮอล์ทางชีวภาพ.....18
2.3.3.2 ข้อดีของการใช้เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรต.....19
2.3.3.3 ข้อเสียของการใช้เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรต.....19
2.4 วิถีการย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีน.....19
2.5 คิเนติกส์ของกระบวนการร่วมย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน.....21
2.6 ความเป็นพิษของผลผลิตระหว่างกระบวนการย่อยสลาย.....27
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....38
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....38
3.2 การดำเนินการทดลอง.....39
3.2.1 การเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ชนิดที่สามารถโตบนโทลูอีนได้.....39
3.2.2 การทดสอบการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถโตบนโทลูอีนได้...40
3.2.3 การทดลองหาค่ายิลด์โดยซับสเตรตชนิดต่าง ๆ 41
3.2.4 การทดลองหาค่า TCE Transformation Yield (T_y) โดยใช้โทลูอีน ฟีนอลและเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตในการบำบัดไตรคลอโรเอทธิลีน.....42
3.2.5 การศึกษาการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์.....48
3.3 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....53
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....54
4.1 การเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถโตบนโทลูอีนได้.....54
4.2 การศึกษาค่า Growth Yield.....56
4.2.1 การศึกษาค่า Growth Yield ของจุลินทรีย์ที่ใช้ฟีนอลเป็นซับสเตรต.....56

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 การศึกษาค่า Growth Yield ของจุลินทรีย์ที่ใช้โทลูอีนและเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรต....58
4.3 การศึกษาค่า TCE Transformation Yield (T_y)....58
4.3.1 การทดลองชุดที่ 1....59
4.3.2 การทดลองชุดที่ 2....61
4.3.3 การทดลองชุดที่ 3....62
4.3.4 การทดลองชุดที่ 4....63
4.3.5 การทดลองชุดที่ 5....64
4.4 ความเป็นไปได้ในการใช้เบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรตแทนโทลูอีนหรือฟีนอล....68
4.5 Competitive inhibition ที่พบในการทดลอง....70
4.6 การศึกษาค่าตัวแปรทางคิเนติกส์ของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์....71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....79
5.1 สรุปผลการทดลอง....79
5.2 ข้อเสนอแนะ....80
รายการอ้างอิง....81
ภาคผนวก....89
ภาคผนวก ก ส่วนประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ Basal Salts Medium....90
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาค่า Growth Yield (Y)....92
ภาคผนวก ค ผลการศึกษาค่า TCE Transformation Yield (T_y)....95
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณค่า TCE Transformation Yield....126
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณการถ่ายเซลล์จุลินทรีย์ส่วนเกินออกจากขวดซีรัม....131
ภาคผนวก ฉ สภาวะการทำงานของเครื่อง Gas Chromatography....135
ภาคผนวก ช สภาวะการทำงานของเครื่อง High Performance Liquid Chromatography....145
ภาคผนวก ซ รูปเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย....155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....160

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไตรคลอโรเอทธิลีน....4
ตารางที่ 2.2 ค่าครึ่งชีวิตของไตรคลอโรเอทธิลีนในสิ่งแวดล้อม....7
ตารางที่ 2.3 การบำบัดสารประกอบคลอรีนไฮโดรคาร์บอนชนิดอะลิฟาติก ภายใต้สภาวะมีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน....8
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของโทลูอีน....11
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของฟีนอล....15
ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของเบนซิลแอลกอฮอล์....17
ตารางที่ 2.7 ค่าตัวแปรทางคิเนติกส์ของกระบวนการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีน โดยใช้โทลูอีนเป็นซับสเตรต.... 25
ตารางที่ 2.8 ค่าตัวแปรทางคิเนติกส์ของกระบวนการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีน โดยใช้ฟีนอลและเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรต....26
ตารางที่ 2.9 ค่า Transformation Capacity และ ค่า Transformation Yield ในการย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนทางชีวภาพโดยซับสเตรตชนิดต่าง ๆ....28
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบที่บรรจุลงในขวดทดสอบจำนวน 11 ขวด ตามสัดส่วนที่แตกต่างกัน..40
ตารางที่ 3.2 ลำดับซับสเตรตที่ใช้ในการทดลอง....47
ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ AQUASIM2.1b....49
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า T_y ที่ได้จากการทดลองกับงานวิจัยที่ผ่านมา....66
ตารางที่ 4.2 ผลจากการประมาณตัวแปรทางคิเนติกส์ที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม AQUASIM2.1b....73
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าตัวแปรทางคิเนติกส์ของกระบวนการร่วมย่อยสลาย ไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้โทลูอีนเป็นซับสเตรตที่ได้จากการประมาณ ด้วยโปรแกรม AQUASIM2.1b กับงานวิจัยที่ผ่านมา....74
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าตัวแปรทางคิเนติกส์ของกระบวนการร่วมย่อยสลาย ไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้ฟีนอลและเบนซิลแอลกอฮอล์เป็นซับสเตรต ที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรม AQUASIM2.1b กับงานวิจัยที่ผ่านมา....75

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการแทนที่ฮาโลเจนอะตอมด้วยไฮโดรเจนอะตอมในสภาวะไร้ออกซิเจน.....9
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของมีเทน.....9
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนแบบใช้ออกซิเจน 9
รูปที่ 2.4 วิถีการย่อยสลายโทลูอีน.....13
รูปที่ 2.5 วิถีการย่อยสลายฟีนอล.....16
รูปที่ 2.6 วิถีการย่อยสลายเบนซิลแอลกอฮอล์.....18
รูปที่ 2.7 วิถีการย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีน.....20
รูปที่ 3.1 การเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถโตบนอาหารชนิดโทลูอีนได้.....39
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ชนิดที่สามารถโตบนอาหารชนิดโทลูอีน จนกระทั่งการเก็บเซลล์จุลินทรีย์เพื่อนำมาใช้งาน.....44
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองหาค่ายิลด์ของจุลินทรีย์ที่ใช้ฟีนอลเป็นซับสเตรต.....45
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดลองหาค่า TCE Transformation Yield สำหรับการทดลองชุดที่ 1.....46
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลโทลูอีนที่ลดลงกับมวลไตรคลอโรเอทธิลีนที่ลดลง ที่เวลาหนึ่ง ๆ จากการประมาณโดยโปรแกรม AQUASIM 2.1b.....51
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลฟีนอลที่ลดลงกับมวลไตรคลอโรเอทธิลีนที่ลดลง ที่เวลาหนึ่ง ๆ จากการประมาณโดยโปรแกรม AQUASIM 2.1b.....51
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมวลเบนซิลแอลกอฮอล์ที่ลดลงกับมวลไตรคลอโรเอทธิลีน ที่ลดลงที่เวลาหนึ่ง ๆ จากการประมาณโดยโปรแกรม AQUASIM 2.1b.....52
รูปที่ 4.1 เชื้อจุลินทรีย์ที่โตบนโทลูอีนได้.....55
รูปที่ 4.2 ค่า OD_{550} ของชุดทดสอบหลังจากทำการทดลอง 3 วัน.....55
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของฟีนอลที่เปลี่ยนแปลงไปที่เวลาหนึ่ง ๆ.....57
รูปที่ 4.4 ค่า OD_{550} ที่เพิ่มขึ้นที่เวลาหนึ่ง ๆ 57
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TCE Transformation yield (T_y) กับลำดับของซับสเตรต ของการทดลองชุดที่ 1 59
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TCE Transformation yield (T_y) กับลำดับของซับสเตรต ของการทดลองชุดที่ 2 61

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TCE Transformation yield (T_y) กับลำดับของซับสเตรต ของการทดลองชุดที่ 3 63
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TCE Transformation yield (T_y) กับลำดับของซับสเตรต ของการทดลองชุดที่ 4 64
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TCE Transformation yield (T_y) กับลำดับของซับสเตรต ของการทดลองชุดที่ 5 65
รูปที่ 4.10 ค่า TCE Transformation yield เฉลี่ยของการทดลองชุดที่ 1 3 และ 5.....68
รูปที่ 4.11 ค่า TCE Transformation yield เฉลี่ยของการทดลองชุดที่ 2 4 และ 5.....69
รูปที่ 4.12 มวลไตรคลอโรเอทธิลีนและโทลูอีนที่ลดลงของการทดลองชุดที่ 1 ลำดับที่ 1 70
รูปที่ 4.13 แบบจำลองของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้โทลูอีนเป็นซับสเตรต.....72
รูปที่ 4.14 แบบจำลองของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้ฟีนอลเป็นซับสเตรต.....72
รูปที่ 4.15 แบบจำลองของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้เบนซิลแอลกอฮอล์ เป็นซับสเตรต.....73
รูปที่ 4.16 Error distribution ของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้โทลูอีน เป็นซับสเตรต.....77
รูปที่ 4.17 Error distribution ของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้ฟีนอล เป็นซับสเตรต.....77
รูปที่ 4.18 Error distribution ของการร่วมย่อยสลายไตรคลอโรเอทธิลีนโดยใช้เบนซิลแอลกอฮอล์ เป็นซับสเตรต.....77

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย