

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและขี้เถ้า

นายสุพัฒน์ เพ็งพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PARAMETERS AFFECTING *ESHERICHIA COLI* ADSORPTION ON ACTIVATED
CARBON PREPARED FROM COCONUT SHELL AND WOOD CHIP

Mr. Suphat Phengphan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* บน

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและขี้เถ้า

โดย

นายสุพัฒน์ เพ็งพันธ์

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานนท์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนีรัตน์ พุกตะ)

สุพัฒน์ เพ็งพันธ์ : ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและขี้เถ้า (PARAMETERS AFFECTING *ESHERICHIA COLI* ADSORPTION ON ACTIVATED CARBON PREPARED FROM COCONUT SHELL AND WOOD CHIP) อ. ที่ปริกษานิตยสาร : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 137 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับเชื้อ *Escherichia coli* ด้วยถ่านกัมมันต์การค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขี้เถ้าด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ ด้วยการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 นาที โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนร่วมกับไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้ามี พื้นที่ผิวเท่ากับ 317.95 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย 0.118 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.49 นาโนเมตร ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 27.89 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 581.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 357.43 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย 0.246 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.46 นาโนเมตร ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 34.62 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าการดูดซับไอโอดีน 617.17 มิลลิกรัมต่อกรัม

การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง มีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ พบว่าอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย และค่าความแรงไอออนเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับ ภาวะที่เหมาะสมของการทดลองคือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 45 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 6 และค่าความแรงไอออนของสารละลายเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ทำให้การดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านปริมาณ 100 กรัมดีที่สุด โดยถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและขี้เถ้าให้ค่าร้อยละการดูดซับสูงสุดคือ 57.44 และ 96.95 ตามลำดับ สาเหตุที่ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าให้ค่าการดูดซับสูงกว่าถ่านจากกะลามะพร้าว เนื่องจากมีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่า ทำให้เชื้อ *E. coli* ซึ่งมีขนาดใหญ่สามารถถูกดูดซับบริเวณรูพรุนได้ จากผลการทดลองถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและจากขี้เถ้าให้ค่าการดูดซับเชื้อเท่ากับ 1.97×10^3 และ 3.49×10^3 โคโลนีต่อมิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ และพบว่าการดูดซับเชื้อของถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิติ.....

ปีการศึกษา2555..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษานิตยสาร.....

#5387246120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : ACTIVATED CARBON / ADSORPTION / *ESHERICHIA COLI* / WOOD CHIP

SUPHAT PHENGPAN : PARAMETERS AFFECTING *ESHERICHIA COLI*
 ADSORPTION ON ACTIVATED CARBON PREPARED FROM COCONUT SHELL AND
 WOOD CHIP. ADVISOR : ASSOC.PROF. THARAPONG VITISANT, Ph.D., 137 pp.

This research aimed to study the adsorption effect of *Escherichia coli* onto activated carbon manufactured from coconut shells and wood chips. By means of physical activation at 800 °C for 180 minutes using steam and nitrogen gas flow, the properties of activated carbon made from wood chips were attributed to 317.95 square meters per gram of surface area, 0.118 cubic centimeters per gram of pore volume, 1.49 nanometers of pore size, 27.891 milligram per gram of Methylene Blue adsorption, and 581.15 milligram per gram of Iodine number, whereas the others made from coconut shell were attributed to 357.43 square meters per gram of surface area, 0.246 cubic centimeters per gram of pore volume, 1.46 nanometers of pore size, 34.62 milligram per gram of Methylene Blue adsorption, and 617.17 milligram per gram of Iodine number.

In this experiment using Column test, the factorial design was employed to measure all variables involved and seek the likely ones affecting the adsorption of *E. coli* onto activated carbon. Regarding the results, the velocity of water stream, the positive potential of the hydrogen ions (pH), and Ionic strengths demonstrated great significance, elucidating that the flow rate of water through the activated carbon was of 45 mL/min, the pH value was equivalent to 6, and Ionic strength of a solution was 0.1 mol/L. This suggests that these parameters were considered as effectively influencing the adsorbent in *E. coli*. That is, the highest adsorption values of 100-gram activated carbon prepared from coconut shells and wood chips were 57.44 percent and 96.95 percent, respectively. Compared to coconut shell-based activated carbon, wooden activated carbon is extremely porous with a very large surface area relative to the favorable size of *E. coli*. The macroporosity of wood chips allows *E. coli* to adhere to the surface of, or in the pores of, the adsorbent medium more easily and efficiently, thus conducive to higher adsorption performance. Finally, based on freundlich equation model, the findings also reveal that adsorption value of activated carbon prepared from coconut shells was 1.97×10^3 CFU/ml per gram, whilst adsorption value of activated carbon manufactured from wood chips indicated 3.49×10^3 CFU/ml per gram.

Department: Environmental Science Student's Signature.....

Academic Year: 2012 Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ผู้ทำการวิจัยจึงขอขอบคุณผู้เกี่ยวข้องทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่เป็นผู้ให้ความรู้ คำชี้แนะ คำแนะนำ ตรวจสอบข้อผิดพลาด ตลอดจนความช่วยเหลือในหลายๆ เรื่อง อันเป็นประโยชน์ต่อศิษย์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงออกมาด้วยดี

ขอกราบของพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนีรัตน์ พุกตะ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำแนะนำ ข้อคิด หลักการต่างๆ รวมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ ตลอดจนจนสารเคมีต่างๆ ในห้องปฏิบัติการตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาวธนพร สายตา นางสาวจันทร์เลขา ภูทองคำ และเพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

อีกทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และทุกๆ คนที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยให้คำปรึกษาและคอยเป็นกำลังใจให้เสมอตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณป้า พี่สาว น้องชาย และญาติพี่น้องทุกคน ที่ได้ให้ความสนับสนุน ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้กำลังใจเป็นอย่างดี ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ช

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 ถ่านกัมมันต์.....	4
2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์.....	5
2.3 ลักษณะและโครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	6
2.3.1 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	8
2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของถ่านกัมมันต์.....	10
2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	12
2.4.1 แบ่งตามชนิดตัวกระตุ้น.....	12
2.4.2 แบ่งตามรูพรุนบนผิวคาร์บอน.....	12
2.4.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์.....	12
2.4.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ.....	13

บทที่	หน้า
2.4.5 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง.....	13
2.5 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	15
2.5.1 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ.....	18
2.5.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี.....	22
2.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	28
2.6.1 ปริมาณร้อยละของเถ้า.....	28
2.6.2 ปริมาณความชื้น.....	28
2.6.3 ความหนาแน่นปรากฏ.....	29
2.6.4 ความแข็งแรงและความทนต่อการขัดถู.....	29
2.6.5 การกระจายตัวของอนุภาคถ่านกัมมันต์.....	29
2.6.6 การดูดซับไอโอดีน.....	29
2.6.7 ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู.....	30
2.6.8 โมลาสันัมเบอร์.....	30
2.6.9 แทนิน.....	30
2.6.10 พื้นที่ผิว.....	30
2.6.10.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	33
2.6.10.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	34
2.6.10.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท.....	35
2.7 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	36
2.7.1 ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ดูดซับสารประเภทก๊าซหรือไอระเหย.....	36
2.7.2 ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ดูดซับสารประเภทของเหลว.....	37
2.8 <i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>).....	38
2.8.1 ลักษณะของ <i>Escherichia coli</i>	38
2.8.2 แหล่งที่พบ <i>Escherichia coli</i>	38
2.8.3 การเจริญเติบโตของ <i>Escherichia coli</i>	39
2.8.4 โรคติดต่อจาก <i>Escherichia coli</i>	39
2.8.4.1 Enterotoxigenic <i>E. coli</i> (ETEC).....	41
2.8.4.2 Enteropathogenic <i>E. coli</i> (EPEC).....	42

บทที่	หน้า
2.8.4.3 Enterohemorrhagic <i>E. coli</i> (EHEC).....	42
2.8.4.4 Enteroaggregative <i>E. coli</i> (EAEC).....	43
2.8.4.5 Enteroinvasive <i>E. coli</i> (EIEC).....	44
2.8.4.6 Diffusely adherent <i>E. coli</i> (DAEC).....	44
2.8.5 การทนความร้อนของ <i>Escherichia coli</i>	44
2.8.6 สาเหตุการปนเปื้อนจากเชื้อ <i>Escherichia coli</i>	44
2.8.7 การควบคุม <i>Escherichia coli</i>	45
2.9 การกรอง.....	45
2.9.1 ลักษณะของการกรอง.....	45
2.9.2 กลไกของการกรองน้ำ.....	46
2.9.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกรองน้ำ.....	48
2.9.4 ประสิทธิภาพของการกรอง.....	49
2.10 การดูดซับ.....	50
2.10.1 กลไกในการดูดซับ.....	50
2.10.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับ.....	53
2.10.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล.....	54
2.11 การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์.....	55
2.11.1 การฟื้นฟูสภาพโดยใช้ความร้อน.....	55
2.11.2 การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์.....	56
2.11.3 การใช้ตัวทำละลายในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์.....	56
2.11.4 การใช้กรดในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์.....	56
2.11.5 การใช้ต่างในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์.....	56
2.10 ถึงดูดซับแบบท่อ.....	56
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	58
3 อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	62
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	62
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	66
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมเชื้อ.....	66

บทที่	หน้า	
3.2.2	ขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้.....	69
3.2.3	ขั้นตอนการกรองผ่านถึงกรองแบบแท่ง.....	71
3.2.3.1	ใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	71
3.2.3.2	ใช้ถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้.....	71
3.2.4	ขั้นตอนการเก็บผล.....	73
3.3	ศึกษาความสามารถในการดูดซับเชื้อ <i>E.coli</i> บนถ่านกัมมันต์.....	74
3.4	ขั้นตอนการทำเส้นโค้งเบรคทูร์จ์ ของถ่านกัมมันต์.....	75
4	ผลการศึกษาและอภิปรายผลการทดลอง.....	76
4.1	การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ.....	76
4.2	ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์.....	77
4.3	การหาปัจจัยสำหรับการทดลอง.....	81
4.3.1	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	81
4.3.2	การทดลองหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ.....	86
4.4	การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ.....	90
4.4.1	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์.....	90
4.4.2	ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย.....	92
4.4.3	ค่าความแรงไอออนของสารละลาย.....	94
4.5	การศึกษาปริมาณการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ.....	95
4.6	การศึกษาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์.....	99
4.4.3	ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	100
4.4.3	ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ.....	101
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	104
5.1.1	ผลการผลิตถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ.....	104

บทที่	หน้า
5.1.2 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์ ทางการค้าและซินไม้.....	104
5.1.3 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัม มันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากซินไม้.....	105
5.1.4 การศึกษาปริมาณการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่าน กัมมันต์จากซินไม้.....	106
5.1.5 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัม มันต์จากซินไม้.....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
รายการอ้างอิง.....	107
ภาคผนวก.....	115
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์.....	116
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์.....	126
ภาคผนวก ค การคำนวณ.....	132
ภาคผนวก ง สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ.....	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	137

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ชนิดและเปอร์เซ็นต์เชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างในบริเวณที่เกิดอุทกภัย.....	1
2.1 ชนิดของสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมีสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์	22
4.1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	76
4.2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์.....	77
4.3 ผลการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์.....	77
4.4 ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> ที่ปัจจัยต่างๆของถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	82
4.5 ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า..	84
4.6 ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> ที่ปัจจัยต่างๆของถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ.....	86
4.7 ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ.....	88
4.8 ปริมาณเชื้อ <i>E. coli</i> ที่ดูดซับโดยถ่านกัมมันต์การค้า 100 กรัม.....	96
4.9 ปริมาณเชื้อ <i>E. coli</i> ที่ดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ 100 กรัม.....	96
4.10 การทดสอบการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	100
4.11 การทดสอบการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> ของถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้.....	101
4.12 ค่าคงที่ของไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> บนถ่านกัมมันต์.....	103
ก.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ (ASTM).....	121
ข.1 ผลการทดลองหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์.....	126
ข.2 ผลการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> จากปัจจัยค่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	127
ข.3 ผลการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> จากปัจจัยค่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์บนถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้.....	127
ข.4 ผลการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> จากปัจจัยค่าเป็นกรด – ต่างของสารละลายบนถ่านกัมมันต์ทางการค้า.....	128

ตารางที่	หน้า
ข.5 ผลการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> จากปัจจัยค่าเป็นกรด – ต่างของสารละลายบนถ่านกัมมันต์ จากซินไม้.....	128
ข.6 ผลการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> จากปัจจัยค่าความแรงไอออนของสารละลายบนถ่านกัมมันต์ ทางการค้า.....	129
ข.7 ผลการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> จากปัจจัยค่าความแรงไอออนของสารละลายบนถ่านกัมมันต์ จากซินไม้.....	129

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์..... 7
2.2	โครงสร้างของถ่านกัมมันต์..... 8
2.3	กลุ่มฟังก์ชันัลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์..... 11
2.4	ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์..... 15
2.5	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ..... 19
2.6	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนินเมื่อซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น..... 23
2.7	ปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับกรดฟอสฟอริก..... 25
2.8	ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี..... 27
2.9	โครงสร้างทางเคมีของเมทิลีนบลู..... 30
2.10	ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับ..... 32
2.11	ไอโซเทอมดูดซับแบบฟลูนดลิช..... 34
2.12	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์..... 35
2.13	กราฟแสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท..... 36
2.14	แบคทีเรีย <i>Escherichia coli</i> ในผนังลำไส้ของมนุษย์..... 39
2.15	กลไกการเข้าทำร้ายเซลล์รูปแบบต่างๆ ของแบคทีเรียสายพันธุ์ <i>E. coli</i> 41
2.16	ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นกับขนาด..... 47
2.17	กลไกในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาตัวกรอง..... 47
2.18	กลไกการกรองน้ำสำหรับเครื่องกรองทรายแบบเร็ว..... 48
2.19	ขั้นตอนในการเคลื่อนย้ายของสารดูดซับไปยังสารถูกดูดซับ..... 52
2.20	รูปแบบการหมดสภาพของถังดูดซับ..... 58
3.1	ถ่านชาร์เนื้อไม้ที่ใช้สำหรับการทดลอง..... 62
3.2	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง..... 63
3.3	กระดาษกรองแบคทีเรียเซลลูโลส – ไนเตรต Whatman ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร..... 65
3.4	ถังกรองแบบแท่ง..... 65

ภาพที่	หน้า
3.5	68
3.6	70
3.7	70
3.8	72
3.9	73
4.1	78
4.2	78
4.3	79
4.4	79
4.5	80
4.6	80
4.7	83
4.8	84
4.9	85
4.10	88
4.11	89
4.12	90
4.13	91

ภาพที่	หน้า
4.14 คำร้อยละการดูดซับ <i>Escherichia coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จาก ซินไม้ โดยปัจจัยค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย.....	93
4.15 คำร้อยละการดูดซับ <i>Escherichia coli</i> บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จาก ซินไม้ โดยปัจจัยค่าความแรงไอออนของสารละลาย.....	94
4.16 เส้นโค้งเบรคทูล์ ระหว่างปริมาณเชื้อ <i>E. coli</i> คงเหลือกับปริมาตรน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ ทางการค้าปริมาณ 100 กรัม.....	98
4.17 เส้นโค้งเบรคทูล์ ระหว่างปริมาณเชื้อ <i>E. coli</i> คงเหลือกับปริมาตรน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ จากซินไม้ปริมาณ 100 กรัม.....	98
4.18 ไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> ในน้ำตัวอย่างหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทาง การค้า.....	101
4.19 ไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ <i>E. coli</i> ในน้ำตัวอย่างหลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จาก ซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ.....	102
ข.1 ผลการวิเคราะห์ BET.....	130
ข.2 ผลการวิเคราะห์ BET.....	131

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องจากปัญหาอุทกภัยครั้งยิ่งใหญ่เมื่อปี พ.ศ. 2554 ทำให้เกิดความเดือดร้อนแก่ประชาชนมากมาย ปัญหาที่สำคัญเป็นอันดับแรก ได้แก่ ปัญหาขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค การเกิดปัญหาอุทกภัยทำให้เราหาน้ำสะอาดมาใช้ได้ยากขึ้นเนื่องจากน้ำส่วนใหญ่เป็นน้ำสกปรก มีการปนเปื้อนไปด้วยสิ่งต่างๆ มากมาย ที่สำคัญคือเชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดโรคที่มีน้ำเป็นพาหะ (water-borne diseases) เมื่อมนุษย์นำน้ำเหล่านี้ไปอุปโภคบริโภคจะเป็นสาเหตุให้เกิดอาการเจ็บป่วยได้ ในสถานการณ์อุทกภัย ตั้งแต่วันที่ 5 - 19 ตุลาคม พ.ศ. 2554 จำนวน 33 จังหวัด 232 อำเภอ พบอัตราป่วยของประชาชนอันดับแรก คือ โรคอุจจาระร่วง ถึง 3,146 ราย สาเหตุสำคัญมาจาก โรคอาหารเป็นพิษ ที่เป็นโรคติดต่อทางอาหารและน้ำที่พบได้บ่อย (สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9 พิษณุโลก กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข) และจาก ข้อมูลการเก็บตัวอย่างน้ำในบริเวณที่เกิดอุทกภัยบริเวณมหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา มาตรวจหาเชื้อโรคพบเชื้อโรคมามากมายดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ชนิดและเปอร์เซ็นต์เชื้อโรคที่ปนเปื้อนในน้ำตัวอย่างในบริเวณที่เกิดอุทกภัย

ชนิดเชื้อโรคที่ตรวจ	จำนวนตัวอย่างที่ตรวจ	จำนวนที่พบเชื้อ	คิดเป็นร้อยละ
เชื้อโรคฉี่หนู	70	40	57.1
เชื้อไวรัสตับอักเสบบี เอ	70	5	7.1
เชื้อ <i>Escherichia coli</i>	70	25	35.7
ไข่มดน้ำกลุ่มพยาธิปากขอ	80	30	37.5
เชื้อ cryptosporidium	80	6	7.5

ที่มา: กองบริหารงานทั่วไปมหาวิทยาลัยมหิดล (<http://www.op.mahidol.ac.th/orga/flood.html>)

เพราะฉะนั้นในขั้นตอนการผลิตน้ำเพื่ออุปโภคบริโภคที่สำคัญ คือกระบวนการกรองเชื้อโรคและสารพิษก่อนที่จะนำน้ำมาเป็นน้ำใช้ ถ้าในน้ำมีจุลินทรีย์ต่างๆ มากมาย การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในน้ำดื่มที่ไม่ได้รับการบำบัดอย่างดีอาจก่อให้เกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับทางเดินอาหารแก่ผู้บริโภคได้ การใช้คลอรีนซึ่งเป็นสารเคมีฆ่าเชื้อโรคสามารถกำจัดเชื้อโรคในน้ำได้ แต่ยังคงหลงเหลือสารตกค้างจำพวกไตรฮาโลมีเทนปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการก่อมะเร็ง อีกทั้งมีผลต่อ

อวัยวะภายในเช่น ตับ ไต และยังส่งผลต่อระบบไหลเวียนโลหิต ระบบสืบพันธุ์ (WHO, 2000) ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้น้ำที่มีสารตกค้างปนเปื้อน ในปัจจุบันได้มีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารเคมีที่ปนเปื้อนทั้งในระบบการบำบัดน้ำและระบบบำบัดน้ำเสีย ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับจุลินทรีย์ซึ่งเป็นวิธีการที่ใหม่และน่าสนใจ โดยทั่วไปแล้วมีการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกรองน้ำมานานแล้ว แต่เป็นการกรองโดยใช้ร่วมกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น ในการศึกษาครั้งนี้ สนใจการใช้ถ่านกัมมันต์ดูดซับจุลินทรีย์โดยไม่ร่วมกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น และงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อสามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในงานวิจัยอื่นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากซินไม้
2. เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและเปรียบเทียบการดูดซับ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากซินไม้

1.3 สมมติฐาน

1. ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับสารมลพิษและจุลินทรีย์ได้โดยอาศัยปัจจัยหลายปัจจัย
2. ถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากซินไม้มีความสามารถในการดูดซับจุลินทรีย์ได้แตกต่างกันในปัจจัยแวดล้อมที่เหมือนกัน

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด - ด่าง อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ และค่าความแรงไอออนที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากซินไม้

1.5 วิธีดำเนินการศึกษา

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ทำการเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3. เตรียมหาวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านชาร์จากเนื้อไม้
4. เตรียมเชื้อ *Escherichia coli* สำหรับทำการทดลอง
5. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับเชื้อ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด โดยมีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่
 - 5.1 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์
 - 5.2 ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย
 - 5.3 ค่าความแรงไอออนของสารละลาย
6. การศึกษาปริมาณการดูดซับเชื้อ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด
7. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านกัมมันต์
 - 7.1 วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวรูพรุน (BET Surface area)
 - 7.2 วิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูตามวิธีมาตรฐานของ JIS 1470-1975
 - 7.3 วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานของ ASTM D4607-94
 - 7.4 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ (SEM)
8. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดติดผิว
9. วิเคราะห์ผล สรุปข้อมูลการศึกษาวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* โดยถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้
2. ได้ข้อมูลที่เป็นพื้นฐานเพื่อใช้สำหรับเป็นประโยชน์ในด้านพาณิชย์

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เป็นวัสดุที่ได้รับการเพิ่มประสิทธิภาพให้มีความสามารถในการเป็นสารดูดซับที่ดียิ่งขึ้น โดยการนำเทคโนโลยีทางด้านวิทยาศาสตร์ ในปัจจุบันมีการนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านต่างๆ รวมถึงทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะด้านการบำบัดน้ำและบำบัดอากาศ ด้วยโครงสร้างของถ่านที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ มีลักษณะรูพรุน พื้นที่ผิวสูง และมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บริเวณผิวและรูพรุน ทำให้มีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลากหลายประเภท วัสดุที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์จะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ในระดับอุตสาหกรรม วัสดุที่นิยมนำมาใช้ผลิต ได้แก่ พีต ถ่านหิน ไม้ และกะลามะพร้าว

ความหมายของถ่านกัมมันต์

มีผู้นิยามความหมายของถ่านกัมมันต์ไว้หลากหลายด้วยกัน ได้แก่

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดความหมายของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่า เป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับ สี กลิ่น รส บางชนิดได้ดี เป็นถ่านที่มีโครงสร้างรูพรุน สามารถผลิตได้จากวัสดุที่เป็นถ่านไม้ ถ่านหิน ถ่านกะลามะพร้าว รวมทั้งถ่านกระดูก โดยใช้วิธีการที่เรียกว่าการก่อกัมมันต์ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2547)

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือถ่านในลักษณะของคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) รูปแบบหนึ่ง ซึ่งได้รับการก่อกัมมันต์ (activation) ทำให้พื้นที่ผิวภายในของถ่าน (internal surface area) เพิ่มมากขึ้น พื้นที่ภายในจึงมีมากขึ้นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นลักษณะรูพรุนหากศึกษาโครงสร้างของถ่านกัมมันต์จากการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์เมื่อตกกระทบวัตถุหรือเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (x-ray diffraction) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะยังคงมีความเป็นผลึกอยู่บ้างแต่ยังไม่เป็นผลึกสมบูรณ์เท่าแกรไฟต์ คุณสมบัตินี้จึงทำให้ถ่านกัมมันต์มีความแตกต่างจากถ่านชนิดอื่น อาทิ ถ่านโค้ก ถ่านลิกไนต์ ถ่านแกรไฟต์ ถ่านไม้ เป็นต้น ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับสูง เพราะมีปริมาตรพื้นที่ผิวภายในสูง ลักษณะโครงสร้างผิวเป็นรูพรุนขนาดเล็ก และว่างไว้ใน การดูดซับ (ปรินทร เต็มญารศิลป์, 2551)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านในรูปแบบที่ไม่เป็นคาร์บอนแกรไฟต์ (non-graphitic carbon) ที่ได้รับการพัฒนาให้มีพื้นผิวภายในและรูพรุนสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับสารได้ทั้งสารที่เป็นก๊าซและเป็นของเหลวถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้จากวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยเกิดขึ้นมาจากธรรมชาติหรือวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น (Jai Y.F., 1998)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านคาร์บอนที่มีรูปร่างแบบอสัณฐานชนิดหนึ่ง สามารถผลิตได้จากการกระตุ้น ทำให้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนเล็กๆ จำนวนมากมาย พื้นผิวภายในเพิ่มมากขึ้นต่อหน่วยปริมาตร ทำให้เป็นถ่านที่มีความสามารถในการดูดซับสูง สามารถดูดซับได้ทั้งของเหลวและก๊าซ จนถึงสารที่สามารถถูกละลายบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้ (Bansal et. al., 1998)

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านคาร์บอนที่มีลักษณะอสัณฐาน มีคุณสมบัติในการดูดซับได้ดี (high adsorption) มีความสามารถในการดูดซับ ก๊าซ อนุภาคแขวนลอย (colloidal solids) และ ก๊าซหลากหลายชนิด วัสดุที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ได้แก่ เปลือกถั่ว ไม้ กระดูกสัตว์ และวัสดุอื่นๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโดยการกระตุ้นหรือการให้ความร้อนที่ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส ด้วยไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ จะทำให้ได้โครงสร้างที่มีรูพรุนมากมาย (honeycomb-like) ถ่านกัมมันต์จะมีความหนาแน่น 0.08 ถึง 0.5 และพื้นที่ผิวภายในเฉลี่ยประมาณ 10,000 ตารางฟุตต่อกรัม (Lewis R.J., 1997)

2.2 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

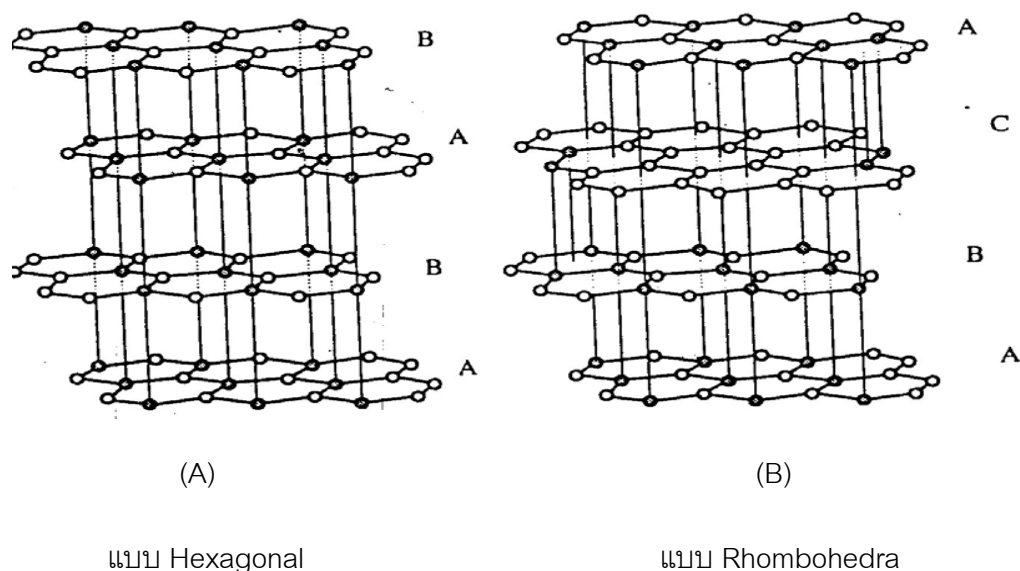
เมื่อคริสต์ศตวรรษที่ 15 ได้มีการคิดค้นผลิตถ่านกัมมันต์จากเนื้อไม้ โดยการนำเนื้อไม้มาเผาในที่อับอากาศ เอาไว้ใช้สำหรับดูดซับสีในของเหลว แต่การใช้ถ่านกัมมันต์สำหรับดูดซับก๊าซเพิ่งจะมีการจดบันทึกไว้เมื่อปี ค.ศ. 1785 แต่ในช่วงนั้นไม่มีผู้ใดให้ความสนใจ จนเมื่อในปี ค.ศ. 1811 ได้มีนักวิทยาศาสตร์คิดค้นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากกระดูก และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตมาจากกระดูกมีประสิทธิภาพดูดซับสีได้ดีกว่าถ่านไม้ ถ่านกัมมันต์จากกระดูกจึงกลายเป็นที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการฟอกสีน้ำตาลทราย หลังจากนั้นก็ได้มีการคิดค้นคว้าและพัฒนาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ต่อมา จนในปี ค.ศ. 1822 พบว่ามีนักวิทยาศาสตร์ผลิตถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาของผสมระหว่างซีอิ๊วกับเลือด ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับสีได้ดีกว่าถ่านกระดูก 20 ถึง 50 เท่า แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม จึงได้ทำให้มีการคิดค้นคว้าพัฒนาและปรับปรุงความสามารถของถ่านกัมมันต์ให้มีการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น โดยกระบวนการเพิ่มพื้นที่ผิว ต่อมาในปี ค.ศ. 1900 นักวิทยาศาสตร์ชาวโปแลนด์ชื่อ Ostreyko ได้ค้นพบวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการเผาภายใต้บรรยากาศของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการ

ใช้คลอไรด์ของโลหะผสมกับถ่านแล้วนำไปเผา นับเป็นการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมผลิตถ่านกัมมันต์ในชื่อต่างๆ อาทิเช่น เอพอนิท (Eponit) ถูกผลิตขึ้นในยุโรปเมื่อปี ค.ศ. 1909 นอริท (Norit) ในปี ค.ศ. 1911 คาร์โบราฟฟิน (Carboraffin) ผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1915 ส่วนในสหรัฐอเมริกาได้มีการผลิตฟิลท์ชาร์ (Filtchar) ในปี ค.ศ. 1913 ซึ่งได้รับการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงชื่อไปเรื่อยๆ โดยที่ถ่านเหล่านี้มีจุดประสงค์ในการนำไปดูดสี ฟอกสีในโรงงานผลิตน้ำตาลทราย เนื่องจากใช้ได้ดีกว่าการใช้ถ่านจากกระดูก

คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในการนำมาใช้ดูดซับกลิ่นและก๊าซเริ่มเป็นที่สนใจอย่างมากในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 เนื่องจากมีการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ นักวิทยาศาสตร์จึงให้ความสนใจในคุณสมบัติในด้านการดูดซับกลิ่นและก๊าซ จึงได้มีการค้นคว้าทดลองในรูปแบบต่างๆ และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการทำหน้ากากดูดซับกลิ่นและก๊าซ เนื่องจากตัวถ่านกัมมันต์มีลักษณะเบา พองได้ง่าย และจำเป็นที่จะต้องใช้จำนวนมาก เป็นเหตุที่ทำให้มีการค้นคว้าพัฒนาการผลิตถ่านกัมมันต์เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับก๊าซพิษ โดยใช้วัสดุชนิดอื่นๆ และการผลิตถ่านกัมมันต์ให้มีความหนาแน่นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นไส้กรองในหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ จึงเป็นสาเหตุให้มีการพัฒนาถ่านกัมมันต์และวัสดุดูดซับเรื่อยมา การค้นคว้าประสบความสำเร็จเมื่อสงครามโลกยุติลงก็ได้มีผู้นำไปใช้กับอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ เช่น การดูดซับไอเบนซิน (Benzene) การดูดซับไอสารระเหย (solvent) เป็นต้น โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากซีเลียม ไม้ ลิกไนต์ พีท และกากที่เหลือจากการผลิตเยื่อกระดาษจากใยเซลลูโลส จะมีลักษณะพองและเบา เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำให้บริสุทธิ์ ใช้กับของเหลว ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตขึ้นจากกะลามะพร้าวเหมาะสมสำหรับใช้ในการดูดซับก๊าซ

2.3 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่ต่างกันตรงที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าการจัดเรียงตัวของผลึกแกรไฟต์ มีส่วนประกอบของชั้นคาร์บอนอะตอมที่อยู่ในรูปของวงเบนซิน ซึ่งแต่ละชั้นมีระยะห่างกันประมาณ 0.355 นาโนเมตร หรือกลุ่มโครงสร้างของอะตอมคล้ายกับรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (regular hexagonal) ต่อกันเป็นชั้นดังแสดงในภาพที่ 2.1

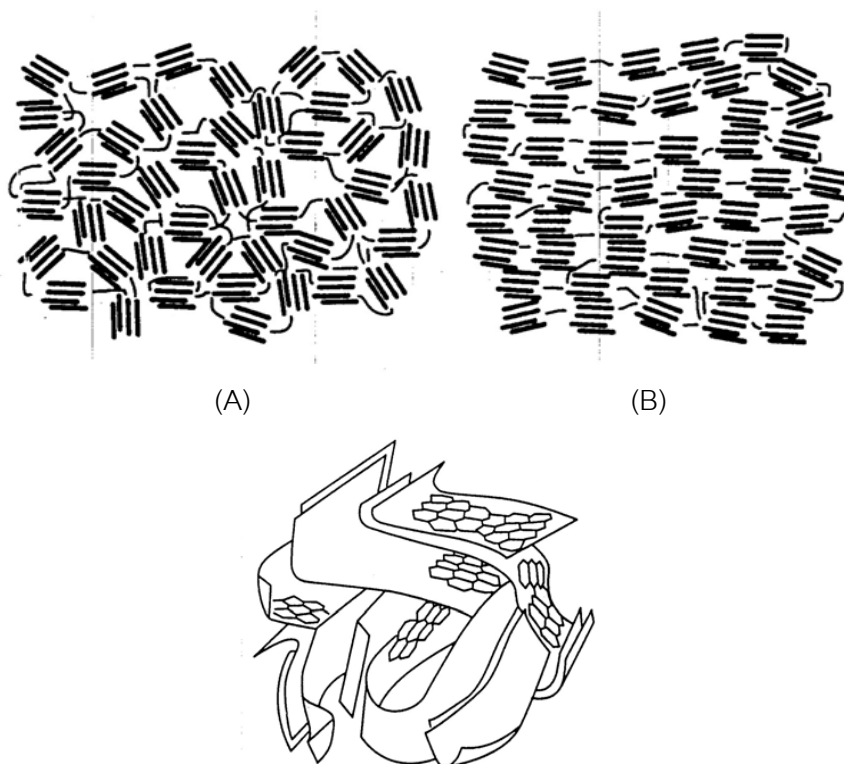


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของผลึกแกรไฟต์

ที่มา: Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain: Secretariado

คือ คาร์บอนอะตอมแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับคาร์บอนอีก 3 อะตอม ในแผ่นราบเดียวกัน (plane) และเกิดในลักษณะที่สมมาตรกัน ซึ่งอิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นแบบซิกมาอิเล็กตรอน มีความยาวระหว่างอะตอมที่อยู่ภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนคาร์บอนที่เหลืออีก หนึ่งอิเล็กตรอน เป็นไพอิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปทั่วของโครงสร้างเกิดลักษณะเป็นเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อให้โครงสร้างมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ส่วนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals) ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมาก แต่ละแผ่นราบมีระยะห่างกัน 0.355 นาโนเมตร ดิสเพลสเมนต์ (displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (layer) จะสามารถเกิดได้ง่าย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของแรงแวนเดอร์วาลอ่อน ดังนั้นโครงสร้างของแกรไฟต์จึงเกิดจุดบกพร่อง (defect) ในโครงสร้างที่บริเวณนี้ได้ง่าย

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะมีโครงสร้างแกรไฟต์ที่ไม่เป็นระเบียบ หรือไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการเบี่ยงเบนในแนวฉากจะมีการซ้อนเหลื่อมกันในแนวระนาบซึ่งมีทิศทางไม่แน่นอน มีการเรียงตัวซ้อนกันประมาณ 3 ถึง 30 ชั้น ชั้นเหล่านี้จะเรียงตัวอย่างไม่สมบูรณ์และทำมุมไม่แน่นอน ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้น ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

- (A) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์เล็กน้อย
 (B) โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นแกรไฟต์ง่าย

ที่มา: Introduction to carbon technologies โดย Marsh, H., 1997, Spain: Secretariado

ส่วนที่ประกอบด้วยวงแหวนเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนในแต่ละชั้นของอะตอมคาร์บอน มีการยึดติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ชนิด เอสพี 2 (sp² covalent bond) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนอะตอมประมาณ 15 นาโนเมตร มีระยะห่างในระหว่างชั้นผลึกมีค่าระหว่าง 2 ถึง 5 นาโนเมตร เนื่องจากกว่าของแกรไฟต์ ช่องว่างเหล่านี้จึงทำให้เกิดเป็นโครงสร้างรูพรุนขึ้นมา

2.3.1 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน เนื่องจากการกระตุ้นถ่านจะทำให้ถ่านมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องว่างและระหว่างผลึกคาร์บอน ซึ่งการเกิดรูพรุนเหล่านี้จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากยิ่งขึ้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวได้ดียิ่งขึ้น ลักษณะการกระตุ้นที่เหมาะสมคือการกระตุ้นที่ทำให้มีความพรุนไม่ใช้การทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่

เมื่อทำการพิจารณาลักษณะพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าบริเวณผิวเป็นรูพรุนจำนวนมาก รูพรุนเหล่านี้มีลักษณะไม่เป็นระเบียบ ไม่สม่ำเสมอ อาทิเช่น ลักษณะแบบคล้ายหลอดแคปิลลารี (capillary pores) ลักษณะแบบแผ่นขนาน (slit pore) บางรูพรุนก็มีลักษณะปลายเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีรูปร่างรูพรุนแบบที่เป็นรูปคอกขวด รูปตัววี จะเห็นว่ารูพรุนเหล่านี้เกิดลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านอย่างไม่เป็นระเบียบ มีความลึกไม่สม่ำเสมอ อีกทั้งมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 3 แบบ ตามขนาดของรูพรุน ได้แก่

1) รูพรุนขนาดเล็ก (micropores) เป็นรูพรุนขนาดเล็กที่มีรัศมีน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จะมีค่าเฉลี่ยของรูพรุนอยู่ระหว่าง 0.6 ถึง 0.8 นาโนเมตร ปริมาตรความพรุนจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัมและมีพื้นผิวจำเพาะอย่างน้อยที่สุด 95 เปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวจำเพาะทั้งหมด พลังงานในการดูดซับของรูพรุนขนาดเล็กมีสูงกว่าเมื่อเทียบกับรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ รูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสำคัญในการดูดซับ

2) รูพรุนขนาดกลาง (mesopores, transitional pores) เป็นรูพรุนขนาดกลางที่มีรัศมีของรูพรุนอยู่ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร มีปริมาตรความพรุนอยู่ในช่วง 0.02 ถึง 0.1 มิลลิลิตรต่อกรัม และมีพื้นผิวจำเพาะประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของพื้นผิวจำเพาะทั้งหมด สารดูดซับที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดกลาง ได้แก่ อะลูมินาเจล (alumina gel) ซิลิกาเจล (silica gel) อะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (amino silicate catalyst) เป็นต้น

3) รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) เป็นรูพรุนขนาดใหญ่ที่มีในถ่านกัมมันต์รัศมีของรูพรุนขนาดใหญ่จะมากกว่า 50 นาโนเมตร ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม และมีพื้นผิวจำเพาะของรูพรุนขนาดใหญ่น้อยกว่า 2 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับรูพรุนชนิดอื่นแล้วพบว่ารูพรุนขนาดใหญ่มีพื้นผิวจำเพาะน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นรูพรุนขนาดใหญ่จึงเป็นรูพรุนที่ไม่มีความสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ แต่ทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า

สรุปการทำงานของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ดังนี้ รูพรุนขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เปิดโดยตรงสู่บริเวณผิวภายนอกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ รูพรุนขนาดกลางซึ่งแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดใหญ่ มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลที่เป็นของเหลวได้บางส่วน แต่จะมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดติดผิวที่ความดันสัมพัทธ์สูง และเช่นเดียวกันรูพรุนขนาดเล็กแตกสาขาออกมาจากรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ รูพรุนขนาดเล็กนี้มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับเพราะเป็นรูพรุนที่มีพื้นผิวจำเพาะสูง มีปริมาตรความ

พูนสูงและมีพลังงานในการดูดซับ (adsorption energy) สูงที่สุด จึงทำให้ที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำสามารถดูดซับได้ดี ดังนั้นรูพรุนขนาดเล็กจึงมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวจำเพาะ และทำให้มีผลต่อความจุในการดูดซับนอกจากนี้ปริมาณรูพรุนในแต่ละขนาดหรือการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ยังขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาผลิตและวิธีการกระตุ้น (Bansal et. al., 1988)

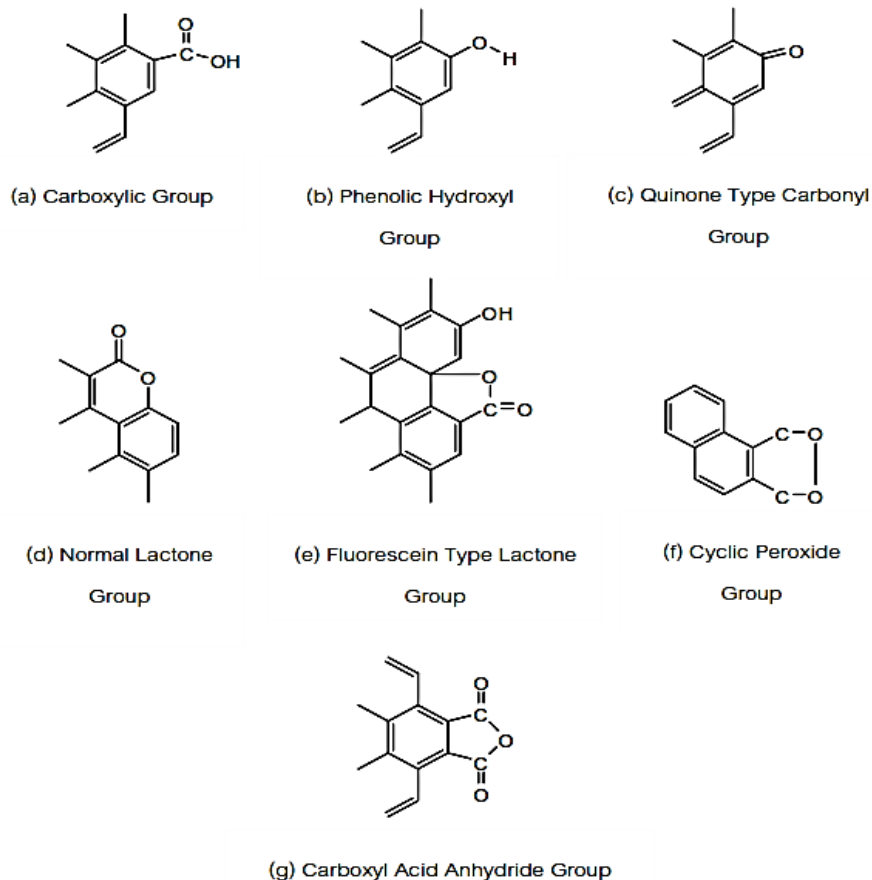
ในถ่านกัมมันต์ที่เป็นเกรดการค้าจะมีขนาดของรูพรุนเป็นขนาดกลางประมาณ 200 ถึง 300 ตารางเมตรต่อกรัม และมีรูพรุนขนาดเล็กอยู่ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 ของพื้นผิวทั้งหมด ถ้าหากบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับของถ่านกัมมันต์จะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาล หรืออาจจะเกิดจากไพอิเล็กตรอน แต่เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวทั้งสองค่อนข้างอ่อน จึงมีโอกาสที่จะหลุดออก ถ้าหากบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์มีหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรงโอกาสของสารที่ถูกดูดติดผิวจะหลุดออกจากกันมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ กลุ่มออกไซด์ของต่างและกลุ่มออกไซด์ของกรด

2.3.2 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากวัสดุที่ผ่านการเผาละลายสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส หรือที่เรียกว่า ไพโรไลซิส (pyrolysis) เรียกอีกอย่างว่า กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ในช่วงที่มีการเผาละลาย อะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน อาทิ ไนโตรเจน ไฮโดรเจน และออกซิเจนจะถูกกำจัดออกไปในรูปแบบของก๊าซ ส่วนอะตอมคาร์บอนที่เหลืออยู่จะถูกจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยวงแหวนเฮลิซม (aromatic ring) ซึ่งเชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดเป็นโพรงหรือเป็นช่องว่าง ซึ่งจะกลายเป็นที่อยู่ของทาร์หรือสารชนิดอื่นๆ ที่ได้รับจากการเผาละลาย ช่องว่างพวกนี้จะกลายเป็นรูพรุนซึ่งมีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยทำการล้างพวกทาร์หรือสารชนิดต่างๆ ที่ได้รับการเผาละลายออกจากโพรงหรือช่องว่างและทำการสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน เพราะฉะนั้นความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมี

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดอยู่ในสภาวะไม่เสถียรมีไม่ครบ 2 หรือ 8 ตัวตามกฎออกเตต หรือวาเลนซ์ไม่อิ่มตัว (unsaturated valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับโมเลกุลหรืออะตอมอื่น อาทิ ออกซิเจนหรืออะตอมต่างๆที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยทำให้การเกาะของอะตอมคาร์บอนและอะตอมชนิดอื่นเกาะกันเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดขึ้นกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่บริเวณขอบของวงแหวนเฮลิซม ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับทางเคมี (chemisorption) กับออกซิเจนที่

อุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และจะกลายเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่มีความแข็งแรงกับอะตอมของไฮโดรเจนไม่สามารถที่จะหลุดออกจากกันได้แม้จะใช้อุณหภูมิที่สูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส สามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนียและดึงซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสามารถดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจนทั้งที่อยู่ในสภาพของเหลวหรือก๊าซได้ (Bansal et. Al., 1988) จึงกลายเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ แต่จุดที่สำคัญคือ ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ กลุ่มของหมู่ฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของคาร์บอนจะประกอบไปด้วย กลุ่ม Phenolic Hydroxyl, Carboxyl, Fluorescein Type Lactone, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactone, Cyclic Peroxide และ Carboxylic Acid Anhydride ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 กลุ่มฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

ที่มา: Cookson, 1978

2.4 ชนิดของถ่านกัมมันต์

สามารถแบ่งชนิดของถ่านกัมมันต์โดยอาศัยหลักต่างๆ ได้มากมาย ขึ้นอยู่กับการใช้งานของผู้ใช้ โดยแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

2.4.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

1) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางด้านกายภาพ (physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ อาทิเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำ เป็นต้น มักจะมีรูพรุนขนาดเล็ก นิยมนำมาใช้ในการดูดซับไอระเหยและก๊าซ

2) ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางด้านเคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับพื้นผิวคาร์บอน มักมีรูพรุนขนาดใหญ่

2.4.2 แบ่งตามรูพรุนบนผิวคาร์บอน

แบ่งตามเกณฑ์ของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)

1) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (micropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนต่ำกว่า 2 นาโนเมตร เป็นชนิดที่มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ นิยมนำมาใช้ในการดูดซับก๊าซและไอระเหย

2) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesopores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วงระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reaction) และใช้ในการดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ อย่างเช่นการฟอกสี

3) ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (macropores) คือถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนสูงกว่า 50 นาโนเมตร โดยปกติแล้วรูพรุนขนาดใหญ่ไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารชนิดต่าง ๆ เป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก แต่มีผลต่อความเร็วในการดูดซับ มักจะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตยาและการฟอกสี

2.4.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

1) ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ นิยมนำมาใช้สำหรับดูดซับในสารละลาย อาทิ การทำน้ำให้บริสุทธิ์ หรือการฟอกสีน้ำตาลดิบให้เป็นน้ำตาลสีขาวบริสุทธิ์

2) ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง นิยมนำมาใช้ในการดูดซับไอระเหย หรือสารพิษ

2.4.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

1) สำหรับสารดูดซับที่เป็นก๊าซ (gas adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับงานดูดซับกลิ่น สารพิษ ไอของสารอินทรีย์ ทั่วไปแล้วเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการเผากระดูกถ่านสังเคราะห์ชนิดแข็ง (hard artificial char) เป็นถ่านที่ได้จากถ่านไม้ที่เผาที่ความดันสูงหรือถ่านที่ได้จากเมล็ดในของผลไม้

2) สำหรับสารดูดซับที่เป็นโลหะ (metal adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับเป็นตัวแยกโลหะชนิดต่างๆ อาทิ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกแร่ แพลทินัม ทองและเงิน เป็นต้น

3) สำหรับสารดูดซับที่เป็นสี (color adsorbents) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ใช้สำหรับเป็นตัวฟอกสี โดยส่วนมากมักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้มาจากการเผากระดูกถ่านสังเคราะห์ชนิดอ่อน (soft artificial char) เป็นถ่านที่ได้มาจากวัสดุหลากหลาย อาทิเช่น ถ่านชานอ้อย ถ่านจากแกลบ ถ่านไม้ ถ่านจากกากน้ำตาล และถ่านหินน้ำมัน เป็นต้น

2.4.5 แบ่งตามลักษณะรูปร่าง

ในอุตสาหกรรมชนิดต่างๆมีการใช้ถ่านกัมมันต์หลายประเภท ดังเช่น ใช้ถ่านกัมมันต์ฟอกสีในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำอัดลม น้ำตาล น้ำมันพืช โมโนโซเดียมแอล-กลูตาเมต อุตสาหกรรมเคมีและเภสัชกรรม ใช้ในการกรองน้ำ ใช้ในการดูดก๊าซในกันกรองบุหรี่ ใช้ในเครื่องทำอากาศให้บริสุทธิ์ เป็นต้น ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.906-2547) สามารถแบ่งถ่านกัมมันต์ออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ชนิดผง ชนิดเกล็ด ชนิดเม็ด และชนิดแท่ง ในแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันทั้งทางด้านขนาด คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ดังนี้

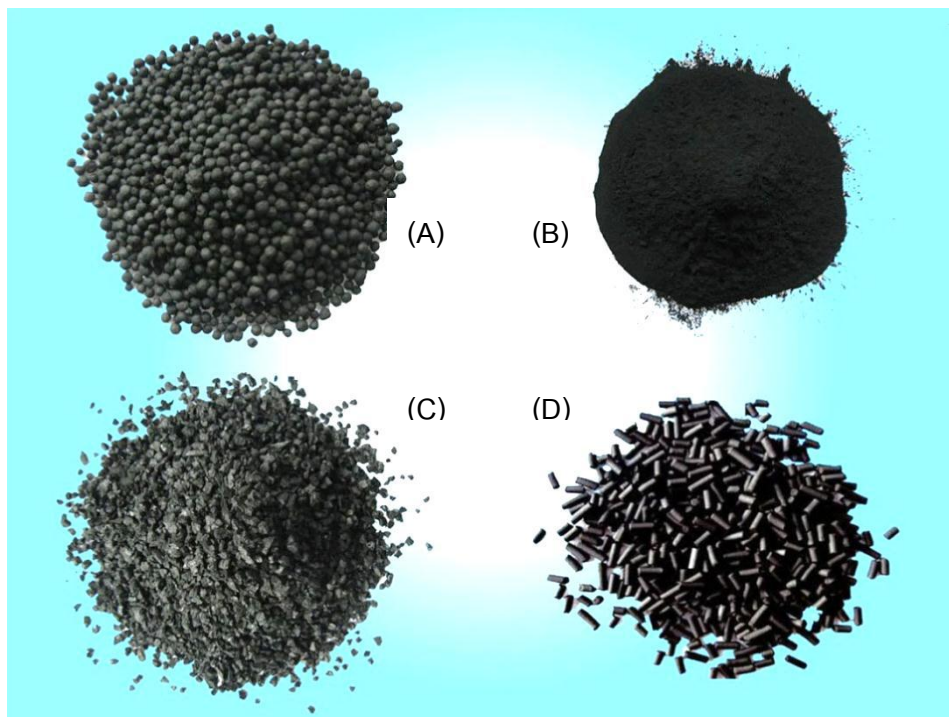
1) ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (pelleted activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 5.0 มิลลิเมตร มีปริมาณที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตรได้ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักลักษณะเป็นเม็ดสีดำ ไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ปนอยู่ มีค่าไอโอดีนอยู่ในช่วง 600 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏประมาณ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความแข็งไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักและมีค่าความชื้นไม่เกิน 3 เปอร์เซ็นต์ รูปร่างของถ่านกัมมันต์ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับเครื่องอัด นิยมนำมาใช้ทำหน้ากักป้องกัน

ก๊าซพิษและไอระเหยต่างๆ นำมาทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำก๊าซให้บริสุทธิ์ ดังภาพที่ 2.4

2) ถ่านกัมมันต์แบบผง (powder activated carbon: PAC) เป็น ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.18 มิลลิเมตร มีปริมาณที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักลักษณะเป็นผงสีดำ ไม่มีสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ปนอยู่ มีค่าไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏอยู่ในช่วง 0.20 ถึง 0.75 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นิยมนำมาใช้ในการดูดซับกลิ่นในสารละลายหลายชนิดและใช้ฟอกสีในของเหลวดังแสดงในภาพที่ 2.4

3) ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon: GAC) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 5.0 มิลลิเมตร มีค่าไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าความหนาแน่นปรากฏประมาณ 0.20 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความแข็งต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 และค่าความชื้นไม่เกิน 3 เปอร์เซนต์ เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูปร่างไม่แน่นอน นิยมนำมาทำให้ตัวทำละลายที่ใช้แล้วบริสุทธิ์ และใช้ทำก๊าซให้บริสุทธิ์ ดังภาพที่ 2.4

4) ถ่านกัมมันต์แบบแท่ง (cloth and fibers activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง จะมีขนาดตามข้อตกลงของผู้ซื้อขาย ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้ปนอยู่ มีค่าไอโอดีน 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีค่าความชื้นไม่เกิน 3 เปอร์เซนต์ ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์

(A) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด, (B) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง, (C) คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และ (D) คือถ่านกัมมันต์ชนิดแท่ง

ที่มา: http://www.alibaba.comproduct-gs250146187coal_based_activated_carbon.html

2.5 การผลิตถ่านกัมมันต์

ปัจจุบันนี้มีวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์หลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ผลิต ลักษณะรวมถึงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการและการนำไปใช้ ตั้งแต่อดีตได้มีการพัฒนา ศึกษาวิจัย และปรับปรุงกันมาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วถ่านกัมมันต์มีวิธีการผลิตแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพและวิธีการกระตุ้นทางเคมี (Dansal et. Al., 1988)

1) ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มผลิตได้จากทั้งวัตถุดิบโดยตรงหรือจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านอยู่แล้ว ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต โดยปกติแล้วขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบมักจะเป็นการนำวัตถุดิบที่จะนำมาผลิตมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปทำการคาร์บอนไนซ์ ถ้าหากวัตถุดิบนั้นมีลักษณะแข็งหรือเหนียวมากอาจนำวัตถุดิบนั้นไปทำการคาร์บอนไนซ์ก่อนแล้วจึงค่อยนำมาบดและคัดเลือกขนาดต่อไป (บุญชัย ตรีภูมิตนตรี, 2537) ส่วนวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผงหรือง่ายต่อการฟุ้ง

กระจาย อาจนำมาอัดเป็นเม็ดก่อน โดยใช้ตัวประสานโดยเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ อาทิเช่น แป้ง ทาร์ น้ำมันเตาซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มาจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ เมื่อทำเป็นเม็ดแล้วจึงได้นำไปทำการคาร์บอนไนซ์และทำการกระตุ้นในขั้นตอนต่อไป (Pendyal B. et. Al., 1999) สำหรับการผลิตเพื่อการค้า สมบัติบางประการที่สำคัญในการคัดเลือกวัตถุดิบคือ มีค่าคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สูง มีปริมาณความชื้น (moisture) ต่ำ มีสารที่ระเหยได้ (volatile matter) ต่ำ มีปริมาณขี้เถ้า (ash) ต่ำ ไม่สลายเมื่อเก็บและสามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

2) ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ (carbonization)

กระบวนการคาร์บอนไนซ์หรือกระบวนการผลิตถ่าน เป็นกระบวนการทางด้านไพโรไลซิสเกิดขึ้นเมื่อมีการเผาวัตถุดิบภายในที่อับอากาศหรือภายในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุด เนื่องจากทำเพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาผลิต ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ ถ่านที่มีลักษณะเป็นสีดำ เรียกว่า ชาร์ (char) ส่วนที่เป็นของเหลวเรียกว่า ทาร์ (tar) และส่วนสุดท้ายคือก๊าซ ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่พัฒนาโครงสร้างรูพรุนบริเวณพื้นผิวของวัตถุดิบ โดยความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่ธาตุคาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และไฮโดรเจน ออกมาในรูปแบบของของเหลวและก๊าซ โดยที่คาร์บอนอิสระจะรวมตัวกันเป็นผลึก (microcrystalline) อยู่ในรูปแบบของถ่านชาร์ ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการเผา ระยะเวลาที่เผาองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อทำการเผาวัตถุดิบให้กลายเป็นถ่าน องค์ประกอบที่เป็นส่วนของคาร์บอนจะสลายไป การสลายจะเกิดขึ้นได้เมื่อวัตถุดิบมีโครงสร้างเป็นเซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น ไม้ ชานอ้อย ช้างข้าวโพด กะลามะพร้าว แกลบ เป็นต้น เมื่อถูกเผากระบวนการแบบไพโรไลซิส จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ถ่านชาร์ที่ได้มาจากการคาร์บอนไนซ์ที่ดีควรมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำตลอด (uniformly black) เมื่อหักดูจะพบว่าส่วนที่หักจะมีผิวเป็นมันเงา (shiny surface) บริเวณปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) และไม่มีผงฝุ่นหรือขี้เถ้า (no ash) กระบวนการคาร์บอนไนซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

(1) การสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างวัตถุดิบในช่วงอุณหภูมิ 27 ถึง 197 องศาเซลเซียส

(2) การคาร์บอนไนซ์จะทำให้เกิดก๊าซและน้ำมันทาร์ภายในโครงสร้างที่ช่วงอุณหภูมิ 197 ถึง 497 องศาเซลเซียส

(3) ช่วงที่การเกาะตัวกันของโครงสร้างถ่านชาร์ โดยที่ในช่วงนี้ น้ำหนักของวัสดุที่นำมาผลิตถ่านจะลดลงไปมาก ที่ช่วงอุณหภูมิ 497 ถึง 847 องศาเซลเซียส

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัตถุดิบ 2 ช่วง คือ ช่วงการอ่อนตัว (softening period) ช่วงนี้ควรให้ความร้อนด้วยอัตราที่ไม่สูงมาก เพื่อให้ทาร์และก๊าซสามารถสลายตัวหลุดออกไปได้โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเป็นของแข็งอุดแน่นภายในรูพรุน และช่วงหลังการอ่อนตัว (after softening period) ช่วงนี้สามารถให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิแบบปกติ เป็นช่วงที่คาร์บอนมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกว่าช่วงการอ่อนตัวโดยถ่านชาร์ที่ได้จะมีลักษณะแข็งและมีความหนาแน่นสูง แต่ว่าถ่านชาร์ที่ได้รับการคาร์บอนไนซ์แล้วก็ยังไม่มีความสามารถในการดูดซับดีเท่าที่ควร เพราะการทำให้เกิดถ่านชาร์ที่อุณหภูมิในช่วง 400 ถึง 800 องศาเซลเซียส ยังมีน้ำมันทาร์หลงเหลืออยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะบริเวณผิว จึงจำเป็นที่จะต้องนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น

อุณหภูมิ เวลา อัตราการเพิ่มความร้อนและลักษณะทางธรรมชาติของวัตถุดิบล้วนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างๆของถ่านชาร์โดยเฉพาะอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากเป็นพลังงานที่ทำให้บริเวณพันธะที่อ่อนหรือหมู่ฟังก์ชันเกิดการแตกหักได้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์และสารระเหยต่างๆ ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็ก อาทิเช่น ทาร์ น้ำ แอมโมเนียและก๊าซต่างๆ หลุดออกไป ถ่านชาร์จะเป็นส่วนที่เหลืออยู่ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลจะเป็นแบบวงแหวนอะโรมาติก โดยที่คาร์บอนอะตอมจะมีการจัดโครงสร้างเป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่เผา

3) ขั้นตอนการกระตุ้น (activation)

การกระตุ้นเป็นกระบวนการที่ทำให้คาร์บอนหรือถ่านชาร์มีความสามารถในการดูดซับให้สูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิว อีกทั้งการทำให้ผิวมีความว่องไวยิ่งขึ้น นอกจากนี้พลังงานความร้อนที่ทำให้เกิดการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการแตกหักของพันธะหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ปฏิกิริยาเคมีของการกระตุ้นยังช่วยกำจัดสารต่างๆที่ค้างอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างผลึกคาร์บอนให้หลุดออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับได้อีกด้วย การที่ผิวมีความว่องไวมากขึ้นเกิดเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีความสามารถในการดูดซับ

ขึ้นมาแทนที่ อีกทั้งยังช่วยในการกำจัดอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุต่างๆ ที่เป็นสารปนเปื้อนออกจากพื้นผิวที่ทำหน้าที่ดูดซับ เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาเคมีในการกระตุ้นจะช่วยให้คาร์บอนเกิดการจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับดียิ่งขึ้น

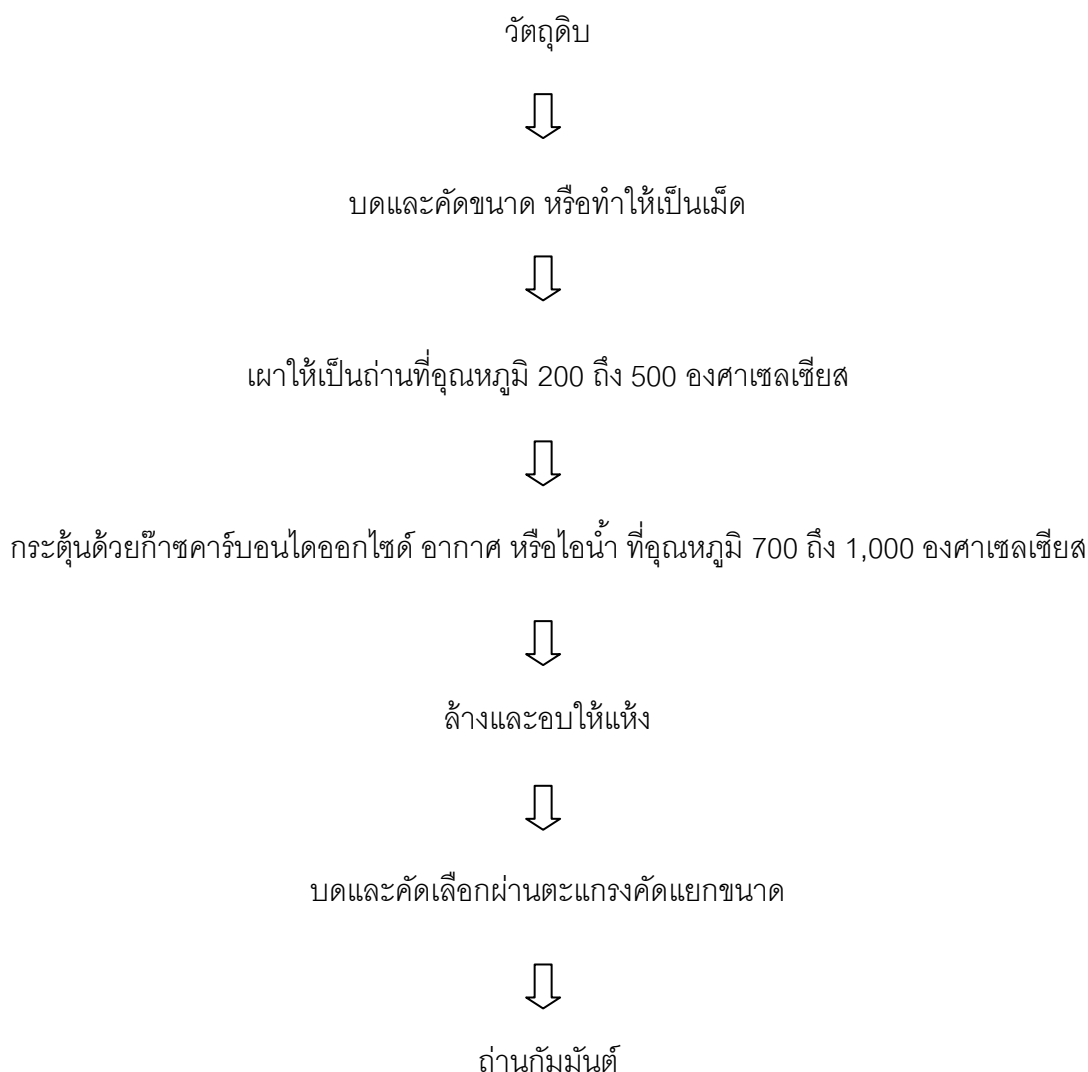
การกระตุ้นถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งได้ตามกลไกที่กระตุ้นได้ 2 ประเภท ได้แก่ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพและวิธีการกระตุ้นทางเคมี

2.5.1 วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

เป็นวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีการที่ทำให้ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ อาทิเช่น การทำให้เกิดรูพรุนที่มีขนาดต่างๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น การจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างคาร์บอน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้มากยิ่งขึ้น ทั่วไปแล้วสารที่นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้นทางกายภาพจะเป็นจำพวกสารออกซิไดซ์ (oxidizing gas) ชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ อิมิตัวยังยวด ก๊าซออกซิเจน และอากาศ เป็นต้น โดยจะใช้ร่วมกับการให้ความร้อน ในปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจใช้ความร้อนแค่อย่างเดียวแต่ต้องใช้ความร้อนที่สูงมากประมาณ 800 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ไม่ดีเท่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ ชนิด สัดส่วนและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัสดุที่นำมาทำวัตถุดิบ คุณสมบัติทางเคมีรวมทั้งอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้กระตุ้น อุณหภูมิในขณะที่เกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Hassler, 1967) ในขั้นตอนการกระตุ้น ก๊าซออกซิไดซ์เหล่านี้จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์และทาร์ที่เหลืออยู่ เกิดเป็นกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (gasification) ทำให้คาร์บอนอะตอมหลุดออกและมีการจัดเรียงตัวใหม่ เกิดเป็นรูพรุนภายในโครงสร้างด้วยกลไกต่างๆ ได้แก่ การสร้าง รูพรุนใหม่ขึ้นมา การขยายให้รูพรุนขนาดเล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นและการเปิดของรูพรุนที่ปิด ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน ตัวทำปฏิกิริยาจะถูกส่งเข้าไปรอบๆ ผิวของอนุภาคและเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุน ทำให้ผิวถ่านมีรูพรุนและมีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น จึงเป็นเหตุให้ความสามารถในการดูดซับมีสูงขึ้น เพราะฉะนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ ทั้งนี้อุณหภูมียังเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการออกซิเดชัน ถ้าหากใช้อุณหภูมิต่ำในการกระตุ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างคาร์บอนกับตัวออกซิไดซ์ต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการช้า แต่ถ้าหากมีการให้อุณหภูมิสูงจนเกินกว่าอัตรา

การแพร่ของตัวออกซิไดซ์เข้าไปภายในอนุภาค ก็จะทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันไปเกิดที่ผิวนอกของอนุภาคทำให้เกิดการสูญเสียคาร์บอนแต่ไม่เกิดรูพรุน

ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีอันตรายตกค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์หลังจากที่ผ่านการกระตุ้นแล้ว นอกจากนี้ยังสามารถนำถ่านไปใช้งานได้ทันที เนื่องจากไม่มีปัญหาในเรื่องการล้างสารเคมีที่เหลือตกค้างที่เป็นอันตราย ส่วนข้อเสียที่เห็นได้ชัดคือต้องใช้ต้นทุนสูงในการกระตุ้นสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี เป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน ขั้นตอนการกระตุ้นทางกายภาพดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ

- วิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

วิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์ โดยวิธีการใช้ไอน้ำในการกระตุ้น การใช้ไอน้ำคือการใช้ไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังแสดงในสมการที่ 2.2



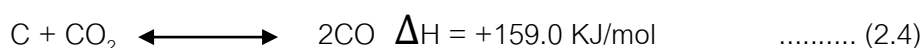
และในปฏิกิริยายังเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งบางส่วนทำปฏิกิริยากับไอน้ำ (exothermic water-gas formation reaction) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ควบคู่ไปด้วย ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังสมการที่ 2.3



ในช่วงที่มีการกระตุ้นต่ำ จะเกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็กเท่านั้น เมื่อเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปในช่วงการกระตุ้นเพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้มีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นและรูพรุนขนาดต่างๆ จะมีขนาดใหญ่ขึ้น การกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) มีช่วงกว้าง และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (total pore volume) โดยปกติเมื่อร้อยละของน้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (% weight loss) สูงกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จะไม่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำต้องใช้อุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรสูงเกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะการเกิดแก๊สซิฟิเคชันส่วนใหญ่เป็นการทำให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้นเพียงเท่านั้น เป็นเหตุให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดลง (Jai Y.F., 1998)

- วิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันของคาร์บอนอะตอมในถ่านชาร์ โดยจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการกระตุ้น ใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส โดยที่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนเช่นเดียวกับวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

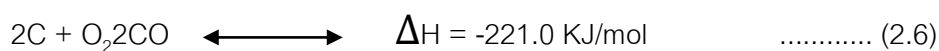
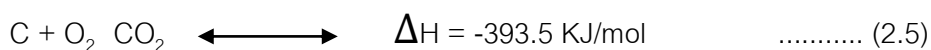


ขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะใช้พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าขั้นตอนการแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำ ดังนั้นจึงต้องใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นสูงมากกว่าการกระตุ้นด้วยไอน้ำและเนื่องจากขนาดโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใหญ่กว่าโมเลกุลน้ำ จึงเป็นเหตุให้อัตราการแก๊สซิฟิเคชัน (rate of gasification) ช้ากว่า โดยส่วนใหญ่แล้วรูปพรุนที่ได้จากการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นรูปพรุนขนาดเล็กตลอดทั้งช่วงของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปในระหว่างการกระตุ้น ซึ่งมีประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาตรรูปพรุนทั้งหมด และมีมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมด ทำให้มีการกระจายของขนาดรูปพรุนน้อย อีกทั้งถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาตรรูปพรุนน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ แต่มีขนาดพื้นที่ผิวใกล้เคียงกัน

โดยทั่วไปแล้วการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าส่วนใหญ่จะใช้วิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เพราะว่าไอน้ำมีความสามารถแพร่เข้าไปในรูปพรุนได้ดี ทำให้อัตราการแก๊สซิฟิเคชันสูง การกระตุ้นใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น และต้นทุนในการใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้นก็ยิ่งต่ำกว่า

- วิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ

วิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศเป็นปฏิกิริยาคลายความร้อน ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส จะเกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็วกว่าวิธีการกระตุ้นด้วยไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6



โดยปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนและอัตราส่วนระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านคาร์บอนที่ได้รับการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิเจนหรืออากาศ จะมีกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นเป็นเหตุให้การควบคุมปฏิกิริยาทำได้ยาก เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ได้ เป็นเหตุให้ไม่ค่อยนิยมนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้น อาจเป็นเพราะออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงมาก

- วิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสีย

วิธีการกระตุ้นด้วยก๊าซไอเสียเป็นการนำก๊าซที่ทิ้งไปกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่เนื่องจากในก๊าซไอเสียมีก๊าซหลายชนิดปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ มีคุณสมบัติในการกระตุ้นถ่าน อาทิเช่น ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ทำให้เกิดการประหยัดในแง่ของเศรษฐศาสตร์

2.5.2 วิธีการกระตุ้นทางเคมี

เป็นวิธีการคาร์บอนไนซ์วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ โดยการนำไปผสมกับสารเคมีที่จะใช้เป็นสารกระตุ้น (activation agent) โดยใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 500 ถึง 900 องศาเซลเซียส โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น โดยทั่วไปแล้ววิธีการกระตุ้นทางเคมีจะใช้กับวัตถุดิบที่เป็นไม้ ซึ่งสารเคมีที่นำมาใช้เป็นสารกระตุ้นจะเป็นสารจำพวก สารประกอบคาร์บอนेट โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบกรดและเบสบางชนิด อาทิ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โพแทสเซียมคาร์บอนेट (K_2CO_3) ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) นอกจากนี้สารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นได้ทำการแบ่งประเภทและแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชนิดของสารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมีสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์

ชนิดที่เป็นกรด	ชนิดที่เป็นเบส	ชนิดที่เป็นเกลือ
กรดบอริก (H_3BO_3)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)	เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)
กรดไนตริก (HNO_3)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)
กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)		โพแทสเซียมไอโซไซยาเนต (KSCN)
		แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca_3(PO_4)_2$)
		แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

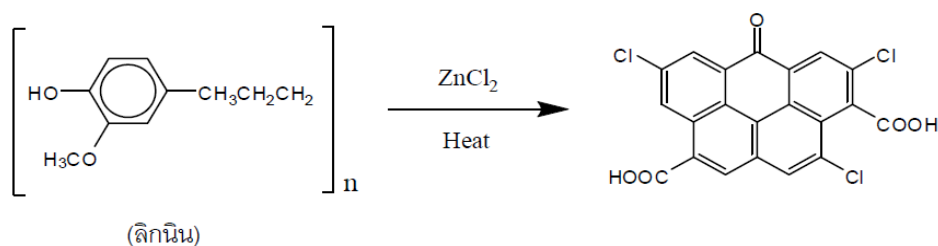
ที่มา: Yehaskel A. (1978)

โดยทั่วไปในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้า ด้วยการใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมีมักใช้สารเคมีชนิดต่างๆ ต่อไปนี้

- วิธีการกระตุ้นโดยใช้ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

ในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซิงค์คลอไรด์ถือว่าเป็นสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นชนิดหนึ่ง โดยซิงค์คลอไรด์เป็นสารเคมีประเภทดูดน้ำ (dehydration agent) ลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีน้ำหนักโมเลกุล 136.28 ความหนาแน่น 2.91 มักจะอยู่ในรูปไฮเดรต ปกติแล้วซิงค์คลอไรด์จะสามารถละลายน้ำได้ดีเมื่อมีความเข้มข้น 0.5 ถึง 1.0 นอร์มอล ถ้าเป็นสารละลายเข้มข้นซิงค์คลอไรด์จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน $[ZnCl_4]^{2-}$ หรือ $[ZnCl_3]$ สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นจะมีความเป็นกรดสูง มีความสามารถในการละลาย เซลลูโลส แป้ง และสารอินทรีย์ต่างๆ

เพราะฉะนั้น เมื่อนำวัตถุดิบมาเผาเป็นถ่านชาร์และนำมาผสมกับสารละลายซิงค์คลอไรด์ โดยใช้อัตราส่วน สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 4 ส่วน ต่อน้ำหนักวัตถุดิบแห้ง 1 ส่วน แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิช่วง 400 ถึง 900 องศาเซลเซียส สารละลายซิงค์คลอไรด์จะเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ดังภาพที่ 2.6



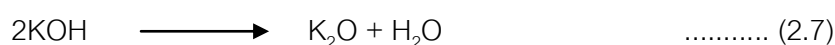
ภาพที่ 2.6 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของลิกนินเมื่อซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น
ที่มา: ปิยะพร บารมี (2542)

จากภาพที่ 2.6 สามารถเห็นได้ว่าโครงสร้างของลิกนินหลังจากถูกกระตุ้นด้วย ซิงค์คลอไรด์จะมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ดังเช่น Cl และ COOH เป็นต้น เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มีความสามารถในการดูดซับ

แต่เนื่องจากการผลิตในระดับอุตสาหกรรมมักมีการคิดถึงประสิทธิภาพในการนำซิงค์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นไปได้อย่างจำกัด และปัญหาในเรื่องการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ในระยะหลัง การใช้ ซิงค์คลอไรด์จึงลดน้อยลง

- วิธีกระตุ้นโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)

เมื่อนำวัตถุดิบที่ต้องการจะนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์มาผสมกับสารละลายที่มีไฮดรอกไซด์โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ของโพแทสเซียมจะทำการแทรกเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ เมื่อมีการให้ความร้อนก็จะทำให้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนภายในวัตถุดิบ กลไกการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้ถ่านมีพื้นที่ผิวสูงแสดงดังสมการที่ 2.7 และ 2.8



จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 เป็นสมการที่แสดงการสลายตัวของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และน้ำ ซึ่งจะเป็นตัวสารที่ทำให้คาร์บอนในถ่านกัมมันต์เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน และเมื่อโพแทสเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ด้วยอะตอมคาร์บอนหรือไฮโดรเจนจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นโลหะโพแทสเซียม ดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ 2.10



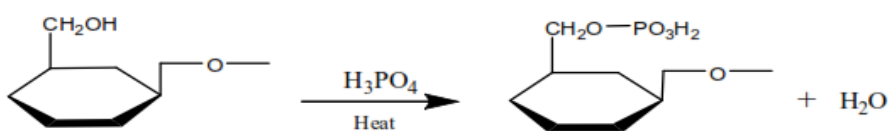
โพแทสเซียมเป็นโลหะที่อ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูง จึงสามารถแทรกเข้าไปในชั้นของอะตอมคาร์บอนได้ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรูพรุนได้มากขึ้น (Otowa T. et. Al., 1993)

- วิธีกระตุ้นโดยใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)

กรดฟอสฟอริกเป็นกรดที่นิยมนำมาใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวนอกจากนี้ยังเป็นกรดที่มีความสามารถในการทำละลายสูง สามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของวัตถุดิบได้อย่างทั่วถึง อีกทั้งยังใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูง คือประมาณ 400 ถึง 500 องศา

เซลเซียส กลไกคือกรดจะเข้าไปทำหน้าที่แตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) สามารถแตกตัวได้ด้วยตนเอง ทำให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น วัตถุประสงค์จะมีความพรุนและพื้นที่ผิวมากขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้กรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้นสำหรับการเตรียมถ่าน กัมมันต์จากวัสดุชีวมวล จะทำให้โครงสร้างเซลลูโลสเกิดความเสียหาย อีกทั้งองค์ประกอบฟอสเฟตยังทำให้โครงสร้างเซลลูโลสเกิดการขยายตัว เป็นผลให้เกิดรูพรุนภายในโครงสร้างขึ้นหลักจากการให้ความร้อน ดังปฏิกิริยาที่แสดงในภาพที่ 2.7



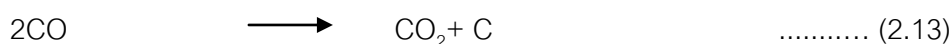
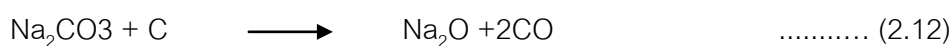
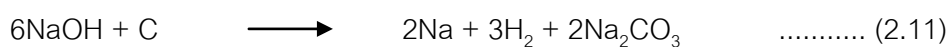
ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับกรดฟอสฟอริก

ที่มา: ณัฐยา พูนสุวรรณ (2545)

ข้อดีของการใช้สารละลายกรดฟอสฟอริกเป็นตัวกระตุ้น คือ เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างสูง ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมากนักและกรดฟอสฟอริกยังสามารถนำไปผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยที่กรดยังมีความเข้มข้นสูงอยู่

- วิธีกระตุ้นโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่ฤทธิ์เป็นด่างเข้มข้น เมื่อนำวัตถุดิบที่ต้องการนำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ผสมกับสารละลายที่ประกอบด้วยไฮดรอกไซด์ โซเดียมชนิดนี้จะแพร่เข้าไปอยู่ในชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่า 700 องศาเซลเซียสโมเลกุลของน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซออกซิเจนจะเกิดการหลุดออกจากโครงสร้าง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยสารประกอบโซเดียมไฮดรอกไซด์ ได้แสดงในสมการที่ 2.11 ถึง 2.13



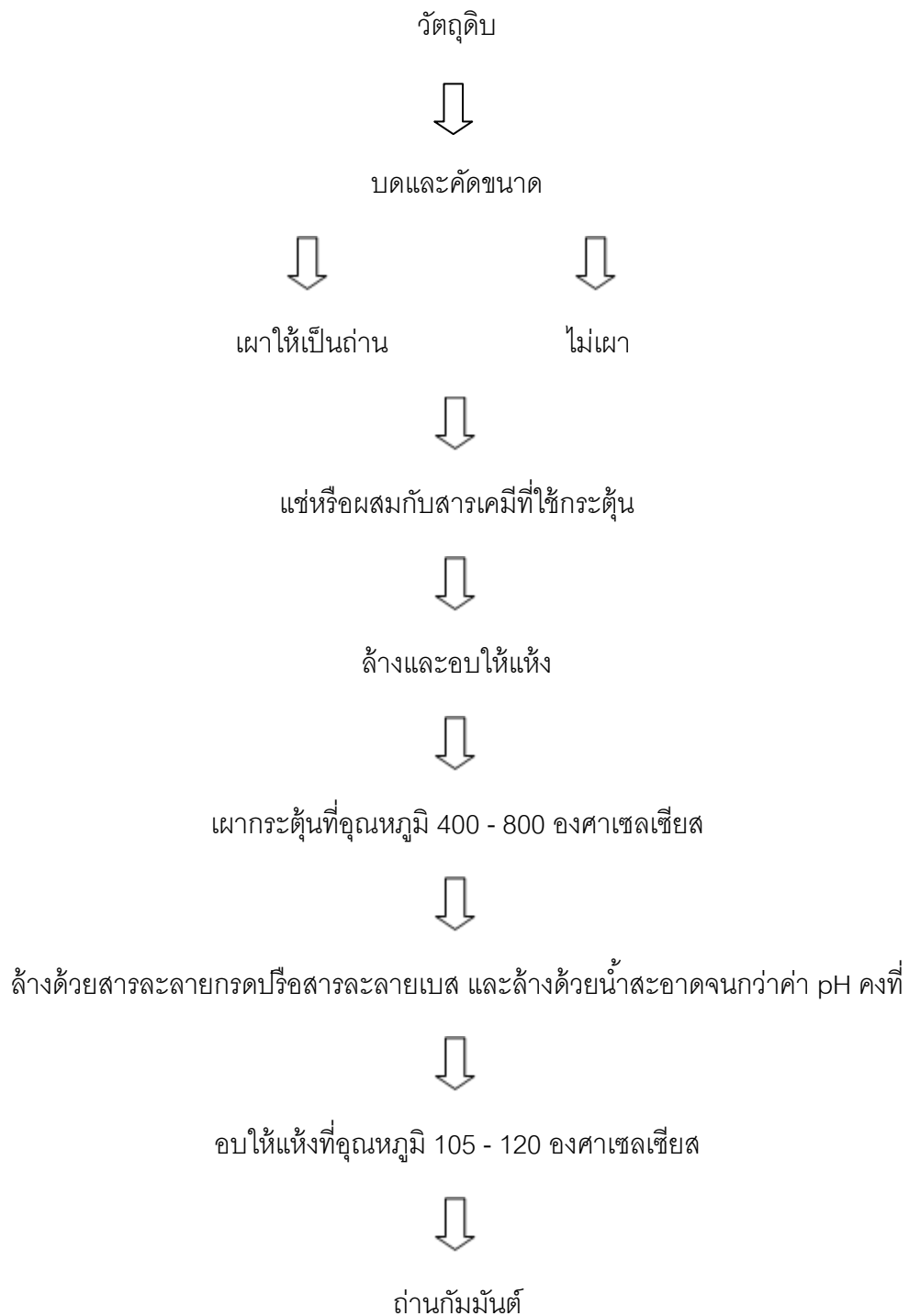
การเติมสารเคมีแต่ละชนิดลงไปจะช่วยกระตุ้นในการทำลายโครงสร้างผิวของ วัสดุฉนวนและการคาร์บอนไนซ์จะก่อให้เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ภายในวัสดุฉนวน แล้วเกิดการ เชื่อมไขว้ระหว่างกัน (cross – link) ในโครงสร้างทำให้เกิดเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ สารระเหยบางตัวที่อยู่ในโครงสร้างของวัสดุฉนวนไม่สามารถหลุดออกได้เพราะการเชื่อมไขว้กันของ โครงสร้าง ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนและทาร์ลดลง การใช้สารเคมีร่วมกับการ เชื่อมไขว้จะทำให้มีความคงทนต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดสภาพหุ้มอยู่รอบๆและ แทรกตัวเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างทำให้การหดตัวน้อยลง เมื่อทำการล้างถ่านด้วยน้ำสะอาดหรือ กรดจะก่อให้เกิดรูพรุนหรือช่องว่างเพิ่มขึ้น

การกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี สามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

1) นำเอาวัสดุฉนวนมาเผาภายในที่อัฒอากาศหรืออัฒออกซิเจนก่อน เพื่อให้วัสดุฉนวน กลายเป็นถ่านชาร์ จากนั้นนำถ่านชาร์ไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น แล้วจึงนำไปเผา กระตุ้นแบบไพโรไลซิส

2) นำเอาวัสดุฉนวนมาแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้นก่อน จากนั้นนำไป เผากระตุ้นแบบไพโรไลซิส โดยทำคู่ไปกับการทำให้เป็นถ่านในขั้นตอนเดียวกัน

ขั้นตอนวิธีการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์โดยวิธีกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการทางเคมีเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการทำให้ถ่านมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นอีกทั้งยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ โดย

ประสิทธิภาพของการกระตุ้นจะขึ้นอยู่กับชนิด องค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ วิธีการที่ผลิต อัตราส่วนของสารเคมีต่อวัตถุดิบ อุณหภูมิ เวลาและชนิดของสารเคมีที่นำมากระตุ้นถ่านกัมมันต์

สำหรับข้อดีของวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางเคมี คือ การใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมากนักและผลผลิตถ่านที่ได้มีปริมาณมากกว่าการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ แต่ข้อเสียก็คือ จะมีสารเคมีตกค้างอยู่บริเวณผิวและภายในของถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการล้างสารเคมีก่อนที่จะนำถ่านกัมมันต์มาใช้งาน อีกทั้ง อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้จะต้องเป็นชนิดพิเศษ ทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมี เนื่องจากสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมก็เป็นปัจจัยที่สำคัญมีผลต่อการเลือกใช้ชนิดของสารเคมีอีกเช่นกัน

2.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์คุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์สามารถพิจารณาได้จากหลายคุณสมบัติด้วยกัน ทั้งการวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมี ทางด้านกายภาพ อาทิเช่น ค่าการดูดซับ เมทิลีนบลู ค่าการดูดซับไอโอดีน ค่าพื้นที่ผิวและค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร เป็นต้น โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์มีดังนี้

2.6.1 ปริมาณร้อยละของเถ้า

การหาปริมาณร้อยละของเถ้าในถ่านกัมมันต์เป็นการหาปริมาณสารอินทรีย์ที่ทนความร้อนสูงและมีการปนเปื้อนอยู่ภายในถ่านกัมมันต์ เนื่องด้วยการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูง ใช้เวลานาน ปริมาณเถ้าก็จะมีมากขึ้น เป็นเหตุให้ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์น้อยลง เพราะเถ้าจะอุดตันอยู่ภายในรูพรุน โดยปกติถ่านกัมมันต์ไม่ควรเถ้าเกินกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก วิธีการกำจัดเถ้าเมื่อถ่านกัมมันต์มีเถ้าในปริมาณสูง คือ การล้างเถ้าออกจากถ่านด้วยน้ำสะอาด หรือสารละลายที่เป็นกรด ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ

2.6.2 ปริมาณความชื้น

เป็นการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่มีในถ่านกัมมันต์ ด้วยวิธีการอบแห้ง โดยทำการอบถ่านกัมมันต์ชนิดผลปริมาณ 1 ถึง 2 กรัมหรือชนิดเม็ด 5 ถึง 10 กรัม แล้วนำไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการอบ 3 ชั่วโมงหรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ แล้วนำมาคำนวณปริมาณความชื้นได้จากค่าน้ำหนักที่หายไป

2.6.3 ความหนาแน่นปรากฏ

เป็นขั้นตอนการหาน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ต่อหน่วยปริมาตร ปริมาตรนี้รวมถึงปริมาตรรวมทั้งหมดของอนุภาค หมายถึง ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์และช่องว่างระหว่างอนุภาค เพราะฉะนั้นค่านี้จึงขึ้นกับขนาดและความพรุนในถ่าน ทั่วไปแล้วถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีความหนาแน่นปรากฏ 0.3 ถึง 0.5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นปรากฏยังขึ้นอยู่กับความชื้นของอนุภาค กล่าวได้ว่า อนุภาคถ่านที่มีความชื้นเพิ่มขึ้นก็จะมีค่าความหนาแน่นปรากฏเพิ่มมากขึ้น ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีจะต้องมีความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์สูง

2.6.4 ความแข็งแรงและความทนต่อการขัดถู

เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกถึงความต้านทานต่อการสึกกร่อน ความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์สำหรับขั้นตอนการล้างวัสดุกรอง และการทนต่อแรงเสียดสี โดยค่านี้จะมีค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้และวิธีการกระตุ้น

2.6.5 การกระจายตัวของอนุภาคถ่านกัมมันต์

ค่านี้สามารถพิจารณาจากความละเอียดของผงถ่าน ยิ่งถ่านกัมมันต์มีอนุภาคที่ละเอียดมากก็จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้โมเลกุลของก๊าซสามารถถูกดูดซับเข้าไปภายในโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังทำให้ความดันของก๊าซในระบบลดลงน้อย เพราะฉะนั้นในอุตสาหกรรมจึงเสียค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานน้อยลง

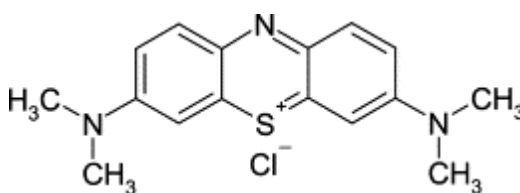
2.6.6 การดูดซับไอโอดีน

ค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ เพราะว่าการดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการใช้หาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และถ่านมีความสามารถดูดซับสารละลายไอโอดีนได้ดี ทำโดยการวัดน้ำหนักของไอโอดีนเป็นมิลลิกรัมต่อน้ำหนักถ่าน 1 กรัม ซึ่ง American Society for Testing and Material (ASTM) ได้กำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของไอโอดีนที่อยู่ในภาวะสมดุลจะเท่ากับ 0.02 นอร์มัล อาจมีค่าแตกต่างได้แต่ต้องอยู่ในช่วง 0.007 ถึง 0.03 นอร์มัล โดยจะสามารถควบคุมได้จากน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีควรจะใช้น้ำหนักในการวิเคราะห์ต่ำ โดยปกติในทางปฏิบัติต้องทำการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์โดยใช้น้ำหนักทั้งหมด 3 ค่า เพื่อที่จะมีปริมาณความเข้มข้นของไอโอดีนที่อยู่ในภาวะสมดุลที่มากกว่า น้อยกว่าและใกล้เคียง 0.02 นอร์มัล จากนั้นใช้วิธีเฉลี่ยแบบลอกาทิม ทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่บางครั้งการที่ถ่าน

กัมมันต์มีพื้นที่ผิว รูพรุนขนาดเล็ก อาจจะทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำ เป็นเพราะโมเลกุลของไอโอดีนไม่สามารถแพร่เข้าไปสู่อรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรได้

2.6.7 ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู

ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลูจะเป็นค่าที่สามารถบอกถึงค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกับขนาดโมเลกุลของเมทธิลีนบลู ซึ่งจะตรงกับช่วงรูพรุนขนาดกลาง กล่าวคือจะมีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า 1.5 นาโนเมตร ซึ่งรูพรุนขนาดนี้มีความสามารถในการดูดซับเมทธิลีนบลูได้ดีที่สุด โครงสร้างของเมทธิลีนบลูแสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของเมทธิลีนบลู

ที่มา: Juan และ Keqiang (2010)

2.6.8 โมลาสันัมเบอร์

เป็นค่าที่บอกจำนวน ปริมาตรรูพรุนขนาดใหญ่ กล่าวคือรูพรุนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 2 นาโนเมตร โดยถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก ค่าการดูดซับโมก็์จะสูง ซึ่งสามารถดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ อาทิเช่น โมเลกุลของสีได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลางหรือรูพรุนขนาดเล็ก ที่มีค่าในการดูดซับไม่ได้ต่ำกว่า

2.6.9 แทนิน

แทนนินเป็นสารผสมที่ประกอบไปด้วยสารที่มีโมเลกุลขนาดกลางและโมเลกุลขนาดใหญ่ ไม่แตกต่างจากถ่านกัมมันต์ที่มีทั้งรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่ เพราะฉะนั้นค่าแทนนินจึงเป็นค่าที่ใช้ในการบอกถึงค่าความสามารถในการดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่และขนาดกลางของถ่านกัมมันต์โดยมีหน่วยเป็น พีพีเอ็ม (ppm : part per million)

2.6.10 พื้นที่ผิว

วิธีการวัดพื้นที่ผิวจะทำโดยใช้ไอโซเทอม (isotherm) ของการดูดซับ เป็นปฏิกิริยาคลายความร้อนโดยที่ไอโซเทอมจะมีตามรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ปัจจัย

หลักที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ความดัน ชนิดของดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ อุณหภูมิ โดยปกติจะทำการควบคุมอุณหภูมิของการดูดซับให้คงที่ และจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณของตัวถูกดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลของการดูดซับเพื่อทำการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ โดยที่ค่าจากไอโซเทอมของการดูดซับจะบ่งบอกถึงค่าของปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิว ทำให้ทราบลักษณะทางเคมีของพื้นผิวตัวดูดซับ ทราบข้อมูลพื้นฐานของขั้นตอนการดูดซับ นอกจากนี้ยังทราบถึงประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบ

สามารถจำแนกไอโซเทอมของการดูดซับออกได้เป็น 5 ชนิด ตามระบบ IUPAC ซึ่งได้ทำการจำแนกไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยนักวิทยาศาสตร์ 4 ท่าน คือ S. Brunauer, L.S. Deming, W.S. Diming and E.Teller (Rouquerol, Rouquerol และ sing, 1999) หรืออาจจะจำแนกไอโซเทอม 5 ชนิดแรกว่าเป็นการแยกตามแบบ BDDT ดังแสดงในภาพที่ 2.10

ประเภทที่ 1 (type I) เป็นไอโซเทอมการดูดซับที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) สามารถเรียกอีกอย่างว่าแบบแลงเมียร์ (langmuir) เป็นไอโซเทอมแบบที่ง่ายที่สุด โดยเป็นปรากฏการณ์การดูดซับสารที่ไม่มีรูพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็ก ได้แก่ ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์ พบทั้งในการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี โดยที่ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูง ค่าเข้าใกล้ 1 การดูดซับจะเกิดขึ้นได้เพียงเล็กน้อย

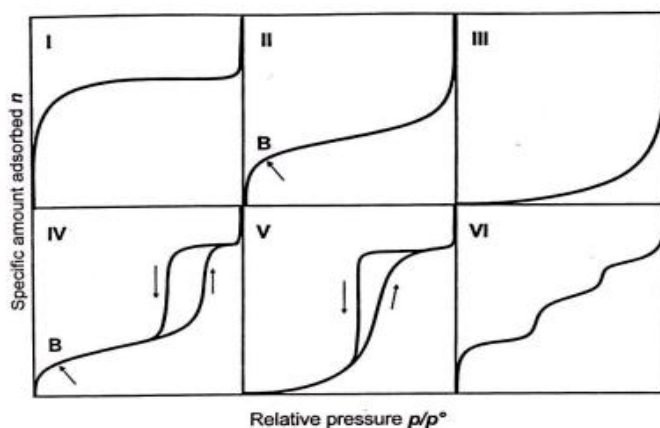
ประเภทที่ 2 (type II) ไอโซเทอมแบบตัวเอส (S-shaped Isotherm) มักจะเกิดในพวกวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีแต่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่ บริเวณจุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point knee of isotherm) จะเป็นตำแหน่งที่ผิวหน้าถูกปกคลุมแบบชั้นเดียวเกือบสมบูรณ์แล้ว เมื่อทำการเพิ่มความดันจะทำให้เกิดการดูดซับมากกว่าหนึ่งชั้น เพราะฉะนั้นการดูดซับชนิดนี้จึงเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

ประเภทที่ 3 (type III) ไอโซเทอมชนิดนี้จะไม่จุดเปลี่ยนกราฟ ลักษณะคล้ายกระจก ว่า ไอโซเทอมรูปแบบนี้จะพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดขึ้นกับการดูดซับที่ไม่แข็งแรง เกิดจากการดูดซับกับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) และของแข็งที่มีรูพรุนส่วนใหญ่ขนาดเล็ก แต่มีแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับไม่แข็งแรงทำให้ดูดซับได้ไม่มาก ทำให้เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่เมื่อเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นจะเกิดการดูดซับกันระหว่างตัวดูดซับด้วยกันเอง ทำให้สามารถดูดซับสูงขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์สูง

ประเภทที่ 4 (type IV) เป็นรูปแบบของไอโซเทอมที่พบมากที่สุดของวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นส่วนใหญ่ (ขนาดรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร) ในระยะแรกจะมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ เส้นไอโซเทอมจะคล้ายกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 หลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความดันสัมพัทธ์สูงมากขึ้น เพราะเกิดจากการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นภายในรูพรุน ซึ่งจะทำให้เกิด Hysteresis loop ในช่วง Desorption โดยที่ข้อมูลอาการเกิดการควบแน่นในช่วงแคปิลลารี สามารถนำมาใช้คำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในวัสดุแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควบแน่นแคปิลลารีจะทำให้ในช่วง Desorption มีปริมาตรการดูดซับสูงกว่าการดูดซับที่ความดันเท่ากัน

ประเภทที่ 5 (type V) คล้ายไอโซเทอมชนิดที่ 1 ต่างกันตรงที่เกิดการควบแน่นภายในรูพรุน (มี hysteresis loop) โดยไอโซเทอมชนิดนี้จะพบไม่บ่อย

ประเภทที่ 6 (type VI) เป็นไอโซเทอมชนิดขั้นบันได (stepped isotherm) จะพบไอโซเทอมชนิดนี้ไม่บ่อยนัก ส่วนมากจะพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนผิววัสดุที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) โดยที่รูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นกับอุณหภูมิ และระบบในการดูดซับ



ภาพที่ 2.10 ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับ

ที่มา: จาก Adsorption by Powers and Porous Solids: Principles, Methodology and Application (19), โดย F., Rouquerol, J., Rouquerol, Sing, 1999, London: Academic Press.

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ขั้นตอนการออกแบบระบบดูดซับต้องทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อให้ได้สารดูดซับที่มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด ในระดับทดลองในห้องปฏิบัติการ (laboratory test) สามารถทำการทดลอง

เพื่อหาความสามารถในการดูดซับของถ่านได้หลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่เป็นที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ วิธีการหาไอโซเทอมการดูดซับ

ความหมายของไอโซเทอมการดูดซับคือ ความสัมพันธ์ระหว่างสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ ณ จุดสมดุลของกระบวนการดูดซับเมื่อนำมาทำการวิเคราะห์ทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้สมการอย่างง่าย จากนั้นนำมาวาดกราฟเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งจะใช้ค่าคงที่เหล่านี้มาออกแบบระบบดูดซับในปัจจุบันได้มีผู้วิเคราะห์ไอโซเทอมไว้ 3 กลุ่มด้วยกัน ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (freundlich adsorption-isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (langmuir adsorption-isotherm) และ ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (brunauer- emmett-teller adsorption-isotherm)

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (freundlich adsorption-isotherm)

สมการของการดูดซับแบบฟรุนดลิชถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง สามารถอธิบายลักษณะการดูดซับภายในระบบของเหลวได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

$$X/m = KC^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

m คือ น้ำหนักของสารดูดซับ(กรัม)

C คือ ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่ในสารละลาย ณ จุดสมดุล (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

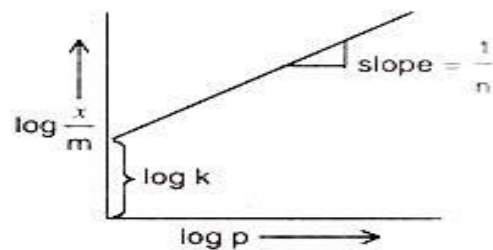
K, 1/n คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

จากสมการที่ 2.14 เขียนได้เป็นสมการ Logarithmic ได้คือ

$$\log (X/m)=\log K+1/n \log C \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log(X/m)$ กับ $\log C$ จะได้กราฟลักษณะเส้นตรง โดยมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ของ $\log(X/m)$ ที่ $\log C = 0$ ($C = 1$) จะเห็นได้จากสมการที่ 2.15 และได้แสดงในภาพที่ 2.11 ความสามารถของการดูดซับสามารถแสดงให้เห็น

เห็นได้จากสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งถ้าค่า $1/n < 1$ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับไม่ดี แต่ถ้า $1/n > 1$ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับดี โดยที่ความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงและดูดซับได้น้อยลงเมื่อความเข้มข้นต่ำลง เส้นไอโซเทอมของถ่านจะมีความชันมาก จะเห็นได้ว่าการดูดซับเมื่อใช้ในระบบสัมผัส ถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมที่ชันมากจะมีประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอมดูดซับแบบฟรุนดลิช

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (langmuir adsorption-isotherm)

Ideal Localized Monolayer Model เป็นสมมติฐานของแบบจำลองแลงเมียร์ ได้แก่

- 1) โมเลกุลจะถูกดูดซับอยู่ในบริเวณที่แน่นอนบนผิวของสารดูดซับ
- 2) มีเพียงโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ดูดซับ
- 3) พื้นที่ผิวเป็นตัวกำหนดลักษณะของพื้นที่บริเวณดูดซับซึ่งจะมีจำนวนที่แน่นอน
- 4) พลังงานสำหรับการดูดซับจะมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

สมการการดูดซับจากสารละลายโดยสารดูดซับคือ

$$X = (X_m bC)/(1+bC) \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

X_m คือ ค่าจำกัดของการดูดซับ (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

C คือ ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ ณ จุดสมดุล (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

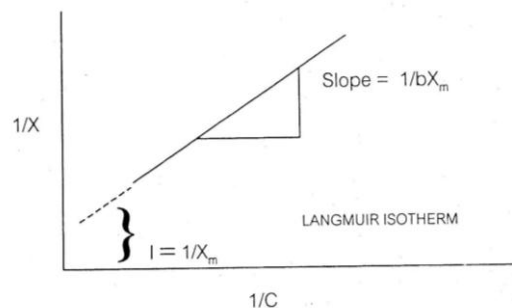
b คือ ค่าคงที่ทางด้านพลังงานของการดูดซับ

$$C/X = (1/bX_m) + (C/X_m) \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่า C/X กับ C ซึ่งเป็นเส้นตรงจะมีค่าตามความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วยค่า C จะได้เป็นสมการเส้นตรง ได้แก่

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/bX_m) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C$ ก็จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง โดยมีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y จะเท่ากับ $1/X_m$ จากสมการ 2.18 สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

- ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (brunauer- emmett-teller adsorption-isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับแบบเบทได้รับการพัฒนามาจากไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งเปลี่ยนจากการดูดซับแบบชั้นเดียวเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น โดยสมมติฐานของแบบจำลองคือ โมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรก จะกลายเป็นบริเวณที่มีโมเลกุลของชั้นถัดๆ ไปดูดซับ

$$X = (X_m bC)/(C_s - C)(1+(b-1)c/c_s) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

โดยที่ X คือ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

X_m คือ ปริมาณของสารดูดซับหรือสารถูกดูดซับที่ภาวะสมดุล (โมลต่อกรัม หรือ มิลลิกรัมต่อกรัม)

C คือ ค่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

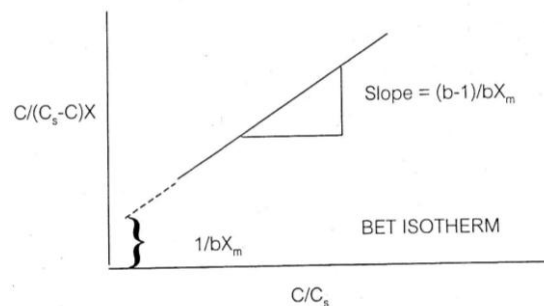
C_s คือ ค่าความเข้มข้นที่อิ่มตัวของสารถูกดูดซับ (โมลต่อลิตร หรือ มิลลิกรัมต่อลิตร)

b คือ ค่าคงที่ทางด้านพลังงานของการดูดซับ

จากสมการ 2.19 สามารถนำมาเขียนได้เป็น

$$C/X (C_s - C) = (1/X_m b) + ((b-1)/X_m b)(C/C_s) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $C/X (C_s - C)$ กับ C/C_s จะได้กราฟเป็นรูปเส้นตรงที่มีความชันเป็น $(b-1)/bX_m$ ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 กราฟแสดงลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแบบแบท

2.7 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติหลักของถ่านกัมมันต์คือความสามารถในการดูดซับสารหลายชนิดได้ดี จึงเป็นที่นิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ดังที่จะกล่าวยกตัวอย่างต่อไปนี้

2.7.1 ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ดูดซับสารประเภทก๊าซหรือไอระเหย

1) ใช้ถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรมผลิตหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งแบบที่ใช้ในการทหารและแบบที่ใช้งานทั่วไป เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับก๊าซพิษและไอระเหยของสารอินทรีย์ได้

- 2) ใช้ถ่านกัมมันต์ทำการแยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
- 3) ใช้ถ่านกัมมันต์แยกเบนซีนออกจากก๊าซอุตสาหกรรม
- 4) ใช้แยกไอรระเหยของตัวทำละลายที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยที่ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอรระเหยที่อุณหภูมิห้อง และจะคายออกมาที่ความดันไอดำ อาทิเช่น การหมัก การสกัดตัวทำละลายอุตสาหกรรมจำพวกพลาสติกและผลิตภัณฑ์ยาง เป็นต้น
- 5) ใช้ถ่านกัมมันต์กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ จำพวก ไนโตรเจน ไฮโดรเจน อะเซทิลีน อีเลียม คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนนอกไซด์และแอมโมเนีย เป็นต้น
- 6) ใช้กำจัดสารประกอบซัลเฟอร์อินทรีย์ จำพวก ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเจือปนต่างๆ ที่ปะปนจากโรงงานอุตสาหกรรม
- 7) ใช้กำจัดกลิ่นในเครื่องปรับอากาศ เพื่อลดกลิ่นเหม็นให้น้อยลง
- 8) ใช้ถ่านกัมมันต์ดูดสารกัมมันตภาพรังสีออกจากปฏิกิริยานิวเคลียร์

2.7.2 ถ่านกัมมันต์ที่นำมาใช้ดูดซับสารประเภทของเหลว

รวมทั้งการฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์ โดยมีการใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ หลายประเภท ดังเช่น

- 1) ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลทราย โดยใช้ในการฟอกสีและทำน้ำตาลดิบให้บริสุทธิ์
- 2) ใช้ถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรมผลิตไขมันและน้ำมันสำหรับบริโภค โดยนอกจากใช้สำหรับการฟอกสียังใช้ในการแยกเพื่อเอาสบู่และเปอร้อออกไซด์ออกจากร้ำมันและไขมัน
- 3) ใช้แยกสิ่งเจือปนในอุตสาหกรรมผลิตอาหาร อาทิ น้ำส้ม เพคติน เจลาติน น้ำผลไม้ ซีอคโกแลต เนื่องจากไม่เป็นอันตรายและไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร
- 4) ใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดรส กลิ่น ที่ไม่ต้องการออกจากเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ได้แก่ ไวน์ วิสกี้ โดยใช้เพื่อช่วยให้ไวน์มีเกรดดีขึ้น ใช้กำจัดตะกอนที่เกิดจากการแช่เย็นของเบียร์ ซึ่งถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่ดูดซับตะกอนโปรตีนที่เอนไซม์ไม่สามารถย่อยได้ อีกทั้งยังใช้ถ่านกัมมันต์ในการเตรียมน้ำสะอาดเพื่อนำไปต้มเบียร์

5) ใช้ในอุตสาหกรรมยาและสารเคมี สำหรับกำจัดสารเจือปนในผลิตภัณฑ์ยาและเคมีภัณฑ์อื่นๆ อาทิเช่น คาเฟอีน (caffeine) โซเดียมอะซิเตท (sodium acetate) สเตรปโตมัยซิน (streptomycin) และพวกกรดชนิดต่างๆ

6) ใช้ในการผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ โดยนำถ่านกัมมันต์มาดูดซับคลอรีนและสารพิษต่างๆที่เจือปนอยู่ในน้ำประปาหรือน้ำบาดาล ซึ่งจะช่วยในการกำจัดสี กลิ่น รส

7) ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือสารพาเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างได้แก่ ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) การใช้เป็นตัวพวงเมอร์คิวริกคลอไรด์ในอุตสาหกรรมผลิตไวนิลคลอไรด์จากกรดไฮโดรคลอริกและอะเซทิลีน ใช้เป็นตัวรองรับสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst support) ใช้เป็นตัวพวงทองคำขาวที่เป็นตัวเร่งในกระบวนการไฮโดรเจน ใช้ผสมสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน ใช้ใส่ในก้นกรองบู่หรือบางชนิด ใช้ดูดควันหรือกลิ่นไม่พึงประสงค์ตามตู้เสื้อผ้า ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

8) ใช้ในด้านการแพทย์ ได้แก่ การให้ยาถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆออกฤทธิ์ที่ความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างยา คือ ไฮโดรซิลอะมิโนฟีนิลาโซนิคแอซิด (hydroxyl aminophenylarsonic acid) ใช้รักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบาและพาราไซต์ อีกทั้งใช้รักษาอาการมีก๊าซมากในประเพาะอาหาร นอกจากนี้ยังใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารพิษ จากผู้ที่กินยาหรือกินยาเกินขนาดอีกด้วย

2.8 *Escherichia coli* (*E. coli*)

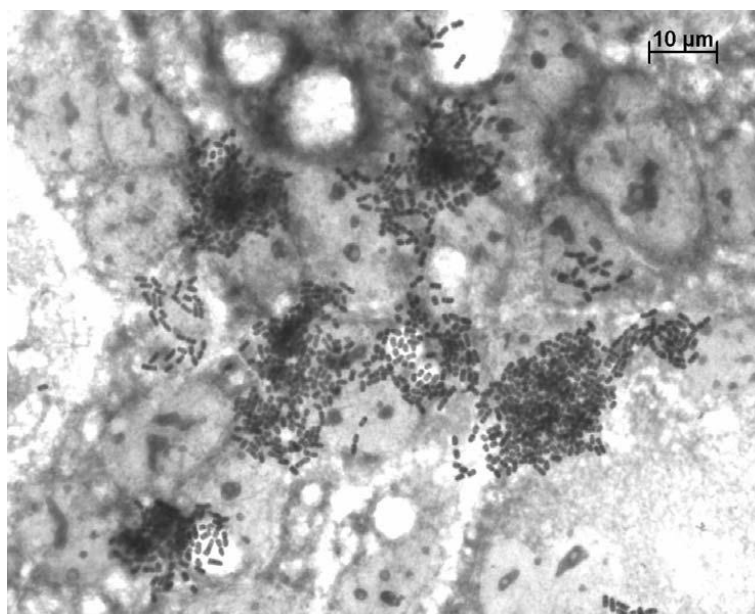
2.8.1 ลักษณะของ *Escherichia coli*

Escherichia coli หรือ *E. coli* เป็นแบคทีเรียที่อยู่ในสกุล Enterobacteriaceae ย้อมติดสีแกรมลบ รูปร่างเป็นท่อน (bacilli) (Evans, Evans และ Dupont, 1979) มีขนาดลำตัวกว้าง 1.1 ถึง 1.5 ไมโครเมตร ยาว 2 ถึง 6 ไมโครเมตร เคลื่อนที่โดยอาศัยแฟลกเจลลา และไม่สร้างสปอร์ (Blackbum และ McClure, 2003)

2.8.2 แหล่งที่พบ *Escherichia coli*

E. coli เป็นแบคทีเรีย normal flora อาศัยอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลือดอุ่นรวมถึงลำไส้ของมนุษย์ สามารถตรวจพบได้ในอุจจาระ โดยปกติจะไม่ก่อให้เกิดอาการเจ็บป่วยในมนุษย์เมื่ออยู่ในลำไส้ของมนุษย์ มักจะมีการปนเปื้อนของแบคทีเรียชนิดนี้สู่อาหารโดยมาจากทั้งน้ำดื่มและวัตถุดิบ

ประเภทเนื้อสัตว์ ผักสด (Roberts, Baird-Parker และ Tompkin, 1996) ลักษณะของ *E. coli* ในลำไส้ของมนุษย์ ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 แบคทีเรีย *Escherichia coli* ในผนังลำไส้ของมนุษย์
ที่มา: Nataro และ Kaper (1998)

2.8.3 การเจริญเติบโตของ *Escherichia coli*

E. coli เป็นแบคทีเรียจำพวก Facultative anaerobe เจริญเติบโตได้ในช่วงอุณหภูมิ 37 ถึง 46 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตคือ 37 องศาเซลเซียส (Abdul-Raouf, Beuchat และ Ammar, 1993) สามารถเจริญได้ในช่วงความเป็นกรดเป็นด่างที่ 4.4 ถึง 9.0 และ a_w 0.95 เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 2.5% แต่ไม่สามารถเจริญเติบโตในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 8.5% สปอร์ (Blackbum และ McClure, 2003)

2.8.4 โรคติดต่อจาก *Escherichia coli*

การติดเชื้อ (infection) ของจุลินทรีย์ก่อโรคในกลุ่ม *E. coli* ไม่เพียงจำกัดอยู่ที่เยื่อ (mucosal) ของลำไส้เท่านั้นแต่สามารถกระจายไปได้ทั่วทุกส่วนของร่างกาย ซึ่งอาการที่แสดงออกให้เห็นถึงการติดเชื้อของแบคทีเรียกลุ่ม *E. coli* สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 อาการ ได้แก่

- 1) เชื้อ *E. coli* ทำให้บริเวณกระเพาะปัสสาวะอักเสบ (urinary tract infection)

2) อาการติดเชื้อ และ/หรือ เยื่อหุ้มสมองอักเสบ (sepsis / meningitis)

3) อาการลำไส้อักเสบ และ/หรือ ท้องร่วง (enteric / diarrheal disease)

การแบ่งกลุ่มชนิดของ *Escherichia coli* สามารถแบ่งสายพันธุ์ออกได้เป็น 6 ชนิด (Nataro and karer, 1998) ดังนี้

(1) Enterotoxigenic *E. coli* (ETEC)

(2) Enteropathogenic *E.coli* (EPEC)

(3) Enterohemorrhagic *E.coli* (EHEC)

(4) Enteroaggregative *E.coli* (EAEC)

(5) Enteroinvasive *E.coli* (EIEC)

(6) Diffusely adherent *E. coli* (DAEC)

กลไกพื้นฐานของการทำให้เกิดโรคจาก *E. coli* สามารถอธิบายได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

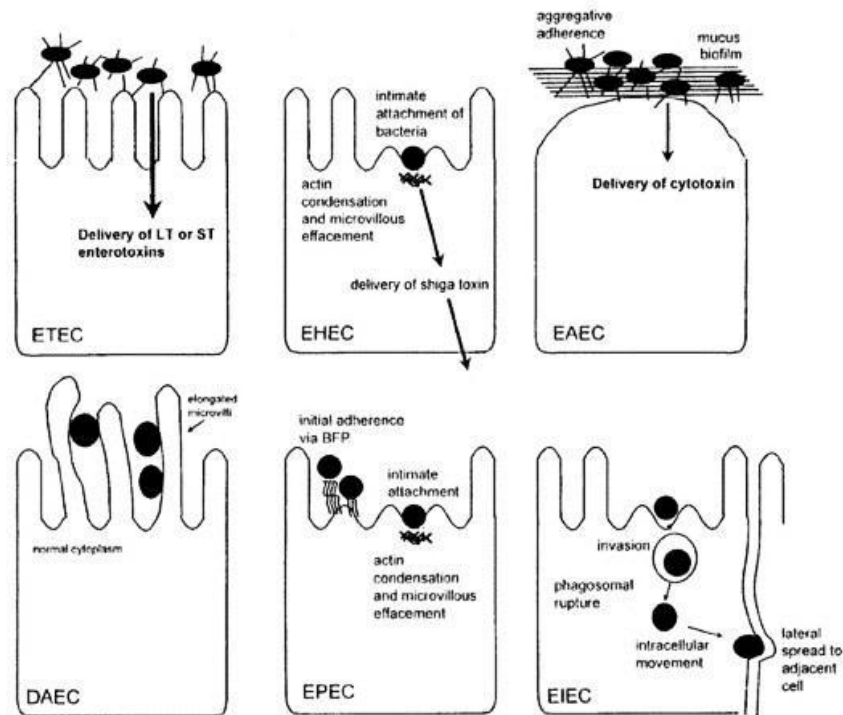
ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการจับและอาศัยบริเวณ Mucosal (colonization of mucosal site)

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการหลบเข้าสู่เซลล์ผู้อาศัย (evasion of host defenses)

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนการเพิ่มจำนวน (multiplication)

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการทำลายเซลล์ที่เข้าอาศัย (host damage)

ในการเข้าทำลายเซลล์ของ *E. coli* นั้นอาจมีความแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ ตัวอย่างเช่น กลุ่ม ETEC จะมีการจับตัวอยู่ในบริเวณ mucosal แล้วทำการปล่อยสารพิษออกมาจากเซลล์ ซึ่งจะก่อให้เกิดอาการเจ็บป่วย อาการท้องร่วง แต่กลุ่ม EICE จะทำการแฝงเข้าไปในเซลล์ก่อน จากนั้นจึงก่อให้เกิดอาการท้องร่วงหรืออาการเจ็บป่วย โดยรูปที่ 2.15 จะแสดงกลไกการเข้าทำลายเซลล์เจ้าถิ่นของ *E. coli* รูปแบบต่างๆ



ภาพที่ 2.15 กลไกการเข้าทำร้ายเซลล์รูปแบบต่างๆ ของแบคทีเรียสายพันธุ์ *E. coli*

ที่มา: Nataro และ Kaper (1998)

2.8.4.1 Enterotoxigenic *E. coli* (ETEC)

E. coli ชนิดนี้ได้เริ่มเป็นที่รู้จักครั้งแรกหลังจากพบว่าเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคท้องร่วงของหมูตัวเล็ก (diarrheal disease in piglets) และยังสามารถให้เกิดการเสียชีวิตของสัตว์ที่เพิ่งเกิด (Alexander, 1994)

ซึ่งในการวินิจฉัยสามารถสรุปอาการได้ 2 แบบ ได้แก่ อาการที่ทำให้เกิดอาการท้องเสียอ่อนๆ (weanling diarrhea) ในเด็กทารกที่เพิ่งหย่านม ในประเทศที่กำลังพัฒนา และอาการที่ทำให้เกิดท้องร่วงในกลุ่มนักท่องเที่ยว (traveler's diarrhea) โดยที่การแพร่ระบาดของ ETEC นี้มีอยู่มาก เนื่องจากมีปัจจัยต่างๆ ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

(I) ระบบภูมิคุ้มกันของเซลล์ภายในลำไส้ ต่อ ETEC จะมีความต้านทานเฉพาะสำหรับผู้ที่เคยติดโรคนี้แล้วเท่านั้น

(II) ผู้ที่หายจากการติดเชื้อ ETEC หรือผู้ที่มีภูมิคุ้มกัน จะยังคงมีเชื้อนี้ปะปนอยู่ในอุจจาระ ที่สามารถแพร่ระบาดต่อไปได้ โดยแพร่ผ่านทางอาหารและน้ำดื่มที่ปนเปื้อน

(III) ผู้ที่จะสามารถติดเชื้อ ETEC ได้ และเกิดอาการเจ็บป่วยจะต้องได้รับเชื้อในปริมาณที่มาก ประมาณ 10^8 เซลล์

สาเหตุที่สำคัญของการติดเชื้อ ETEC คือการปนเปื้อนของน้ำดื่มและอาหาร (Black et al., 1981; Long et al., 1994; Wood et al., 1983)

2.8.4.2 Enteropathogenic *E. coli* (EPEC)

เป็นจุลินทรีย์อีกชนิดที่เป็นกลุ่มที่ก่อให้เกิดโรคท้องร่วงในเด็กที่อาศัยอยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนา โดยกลไกของการทำให้ท้องเสียคือ เมื่อเกิดอาการติดเชื้อ EPEC ที่บริเวณเยื่อบุผิวลำไส้แล้ว จะทำให้ความต้านทานของเนื้อเยื่อบริเวณนั้นลดต่ำลง เป็นเหตุให้ของเซลล์ในลำไส้ที่ทำหน้าที่คัดเลือกสารต่างๆ ผ่านเข้าออกเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เกิดอาการท้องร่วงหรือท้องเสียได้ โดยที่การแพ้วระบาดจะสามารถเกิดได้ใน

(I) เด็กที่ติดเชื้อ EPEC อาจเป็นเด็กที่มีอายุมากกว่า 2 ปี และเชื้อยังทำให้ผู้ใหญ่ได้เมื่อได้รับเชื้อในปริมาณสูง (ประมาณ $10^8 - 10^{10}$ cell) เกิดอาการท้องเสียหรือท้องร่วงได้

(II) ผู้ที่ติดเชื้อ EPEC แต่อาการยังไม่แสดงออก และเชื้อสามารถส่งผ่านน้ำและอาหารที่ปนเปื้อนได้

(III) ในประเทศที่พัฒนาแล้ว อาทิเช่น ประเทศอังกฤษสหรัฐอเมริกา เพราะสามารถติดเชื้อจากอาหารในร้านค้าบริการมากมาย

(IV) ประเทศที่กำลังพัฒนา ซึ่งศึกษาพบว่า สามารถแยกเชื้อแบคทีเรีย EPEC ได้จากเด็กในช่วงอายุแรกเกิดถึง 6 เดือน และ EPEC นั้นสามารถพบได้ในน้ำนมของแม่ในช่วงแรกกำเนิดทารก (colostrum) และในน้ำนม (Camara et al., 1994, Cravioton et al., 1991)

2.8.4.3 Enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC)

แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นที่รู้จักกันในกลุ่มของ *E. coli* เนื่องจากมีการระบาดครั้งยิ่งใหญ่ 2 ครั้งในประวัติศาสตร์ ได้แก่ ครั้งแรกเมื่อปี 1983 (Riley et al., 1983) ซึ่งในการระบาดครั้งนั้นลักษณะการเจ็บป่วยค่อนข้างรุนแรง โดยอาการเริ่มจากเจ็บท้องเล็กน้อย แล้วมีการขับถ่ายน้ำออกมา จากนั้นเริ่มมีการถ่ายออกมาเป็นเลือดไม่หยุด โดยมีไข้เล็กน้อยหรืออาจไม่มีไข้ร่วมด้วย ซึ่งจะมีอาการถ่ายเป็นเลือด (hemorrhagic colitis ; HC) หลังจากนั้นมีการคัดแยกแบคทีเรีย

E. coli ออกจากอุจจาระของผู้ป่วยที่มีอาการ พบว่ามี *E. coli* serotype O157:H7 ปริมาณน้อยมาก โดยที่สาเหตุหลักในการแพร่ระบาดเกิดขึ้นจากการรับประทานแฮมเบอร์เกอร์ที่ได้รับการให้ความร้อนไม่เพียงพอต่อการฆ่าเชื้อโรคในร้านอาหาร (fast food restaurant chain) สำหรับการระบาดในครั้งที่ 2 ได้เกิดขึ้นในปีเดียวกันคือใน ค.ศ. 1983 โดยที่ Kamali et al.) ได้รายงานอาการตกเลือดในไต (hemolytic uremic syndrome, HUS) ของผู้ป่วยที่มีอาการติดเชื้อแบคทีเรีย โดยได้พบพิษของ *E. coli* และเชื้อ *E. coli* ที่เป็นตัวสร้างพิษในอุจจาระ (cytotoxin and cytotoxin producing *E. coli*) การเกิดอาการถ่ายเป็นเลือดจากการติดเชื้อ *E. coli* นั้น จะมีความหมายถึงอาการ 3 ลักษณะ ได้แก่อาการเลือดออกในเส้นโลหิตฝอย (microangiopathic hemolytic anemia) อาการไตวายเฉียบพลัน (acute renal failure) และอาการเกล็ดเลือดไม่แข็งตัว (thrombocytopenia) โดยที่ Nataro และ Kaper (1998) ได้ทำการจัดให้กลุ่มของ 'Verotoxigenic *E. coli*' หรือ 'Verocytotoxin-producing *E. coli* (VTEC) นั้นอยู่ในกลุ่มเดียวกับ EHEC เพราะมีการสร้างพิษ cytotoxin และกลุ่มของ EHEC นั้นก็มีลักษณะพิเศษคล้ายกับ 'Shiga toxin-producing *E. coli*' (STEC) ซึ่งเป็นพิษของ *Shigella dysenteriae* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดโรคบิด ก็ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของ EHEC เช่นเดียวกัน (O'Brien and Holmes, 1987; O'Brien and Holmes, 1996; O'Brien et al., 1992; Sears and Kaper, 1996; Tesh and O'Brien, 1991) โดยที่การระบาดของ EHEC สามารถติดต่อได้จากสัตว์ที่มี EHEC เป็น Normal flora อาทิเช่น ฝูงสัตว์การเลี้ยงสุกร แพะ แกะ ไก่ สุนัข แมว และสัตว์ตระกูลเป็ด (gull) อีกทั้งยังสามารถติดต่อสู่คนได้เช่นเดียวกัน ขั้นตอนการติดเชื้อจะเริ่มจากการบริโภคอาหารที่ปนเปื้อน อาจมีการปนเปื้อนมาจากร้านอาหาร จากการรายงานในช่วงเดือนธันวาคม 1992 ถึงช่วงเดือนมกราคม 1993 จะเห็นว่ามีผู้ป่วยที่พบในรัฐ Washington, California, Nevada และ Idaho สูงถึง 732 ราย โดยในจำนวนนี้มี 195 รายที่ป่วยและเข้ารับการรักษา และมีอีก 4 รายที่เสียชีวิต (Bell et al., 1994, Griffin, 1995)

2.8.4.4 Enteroaggregative *E. coli* (EAEC)

จุลินทรีย์ชนิด EAEC มีความสามารถในการก่อให้เกิดโรคในคนได้โดยการที่ EAEC จะเข้าไปจับตัวที่เยื่อเมือกลำไส้หรือผนังลำไส้ และจะสร้างฟิล์มที่หนา ขึ้นมาเคลือบปกคลุม ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของเซลล์เยื่อเมือกทำให้มีการขับเมือกออกมามากกว่าปกติ ลักษณะเป็นเหมือนการติดเชื้อจาก EHEC (EHEC จะสร้างพิษไปกระตุ้น ทำให้เซลล์เยื่อเมือกมีการสร้างเมือก

ออกมา) อาการโดยรวมคือท้องเสีย ซึ่งอาการที่เด่นคือจะมีการท้องเสียยาวนานมากกว่า 14 วัน (Donnenberg et al., 1992, Henry et al., 1996)

2.8.4.5 Enteroinvasive *E. coli* (EIEC)

จุลินทรีย์ชนิด EIEC นี้เมื่อทำการทดสอบทางด้านซีวะเคมี จะมีลักษณะใกล้เคียงกับ *Shigella spp.* โดยที่ขั้นตอนของการทำให้เจ็บป่วยจะเริ่มจาก EIEC แทรกตัวเข้าไปในผนังเซลล์ ซึ่งจะทำให้เซลล์ของ vacuole แตกออก จะมีการแบ่งตัวและเข้าสู่ cytoplasm และมีการทำให้เซลล์เป็อบผนังลำไส้ขยายออกจนเกิดอาการเจ็บท้องและท้องเสียชั้นรุนแรง ลักษณะของการถ่ายจะมีการถ่ายเหลวเป็นน้ำ (goldberg and Sansonetti, 1993, Sansonetti, 1992) โดยที่การระบาดนั้นจะเกิดจากการรับประทานอาหารและเครื่องดื่มที่ปนเปื้อนจุลินทรีย์ EIEC และบางส่วนก็มีการติดต่อจากคนสู่คนโดยตรงด้วย (Snyder et al., 1984; Harris et al., 1985)

2.8.4.6 Diffusely adherent *E. coli* (DAEC)

เป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดอาการท้องร่วงในเด็กอายุระหว่าง 1 ถึง 5 ปี (Levine et al., 1993) โดยที่ EAEC จะทำการแทรกตัวในผนังลำไส้ และขับเมือกออกมาซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการขับถ่ายออกมาเป็นของเหลว ยังคงพบการระบาดของเชื้อชนิดนี้อยู่บ้างแต่ไม่มากนัก (Yamamoto, 1994)

2.8.5 การทนความร้อนของ *Escherichia coli*

E. coli เป็นแบคทีเรียที่ไม่ทนความร้อน สามารถฆ่าเชื้อได้ด้วยอุณหภูมิพาสเจอร์ไรซ์ 63 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที (Forsythe, 2002) หรือฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที (Gross และ Row, 1985)

2.8.6 สาเหตุการปนเปื้อนจากเชื้อ *Escherichia coli*

E. coli มักมีการปนเปื้อนมากับน้ำ วัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิตอาหาร อาทิเช่น เนื้อสัตว์ ผักสด รวมทั้งอาหารที่ไม่ได้ทำให้สุกหรือผ่านความร้อน อีกทั้งการปนเปื้อนระหว่างวัตถุดิบกับผลิตภัณฑ์ที่ปรุงสุก รวมถึงการปนเปื้อนจากผู้ประกอบอาหารที่มีลักษณะสุขอนามัยไม่เหมาะสม (Forsythe, 2002) ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญของการปนเปื้อน *E. coli* ในอาหาร Temelli et al. (2006) ได้ทำการศึกษาแหล่งปนเปื้อนในระหว่างการผลิตเนื้อหอยแช่แข็ง พบว่าแหล่งปนเปื้อน

มากเป็นอันดับแรกคือวัตถุดิบและอากาศ การปนเปื้อนต่อมาคือมือของพนักงานและอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิต

2.8.7 การควบคุม *Escherichia coli*

ขั้นตอนการควบคุมและป้องกันเชื้อ *E. coli* สามารถทำโดยการควบคุมที่ระบบการผลิต อาทิขั้นตอนการให้ความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการฆ่าเชื้อ อีกทั้งการจัดการในส่วนของสุขลักษณะการผลิตที่เหมาะสมเช่น วิธีการเก็บรักษาวัตถุดิบแยกออกจากผลิตภัณฑ์ที่ปรุงสุกแล้ว และควรมีมาตรการในการควบคุมเรื่องสุขอนามัยส่วนบุคคลสำหรับพนักงานและผู้ประกอบอาหาร รวมถึงการควบคุมให้มีการล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตให้สะอาดและมีประสิทธิภาพอยู่เสมอ (Roberts et al., 1996)

2.9 การกรอง (filtration)

การกรองเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในขั้นตอนการกำจัดของแข็งที่แขวนลอยออกจากของน้ำอย่างแพร่หลาย โดยจะใช้กระบวนการนี้กับน้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นที่ 2 หรือขั้นทุติยภูมิ (secondary treatment) ก่อนที่จะปล่อยน้ำออกสู่ภายนอก และการกรองยังถูกใช้ในการกำจัดของแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากการตกตะกอนด้วยปูนขาว อีกทั้งยังใช้ในการบำบัดขั้นต้น (pretreatment) ก่อนที่จะถูกส่งเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์ (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.9.1 ลักษณะของการกรอง

การกรองแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (Surface Filtration) และการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (in-depth filtration) (มันสิน, 2539)

(1) การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (surface filtration) คือการกรองตะกอนที่แขวนลอยหรือที่มีลักษณะขุ่น ซึ่งตะกอนจะถูกจับและติดค้างอยู่บริเวณผิวของตัวกรอง ตัวกรองอาจเป็นแผ่นใยสังเคราะห์ แท่งกรอง หรือผ้า โดยการกรองแบบติดผิวชั้นกรองแบ่งได้ออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่

1) ตัวกรองที่เป็นแผ่นกรอง โดยอาจทำมาจากแผ่นโลหะ ผ้า หรือแผ่นใยสังเคราะห์

2) ตัวกรองที่เป็นแท่งกรอง โดยจะมีลักษณะเป็นแท่งทำจากวัสดุที่มีความพรุนที่ยอมให้น้ำเท่านั้นที่สามารถผ่านได้เท่านั้น พวกตะกอนของแข็ง ความขุ่นที่อยู่ในน้ำจะติดค้างอยู่บนวัสดุกรอง

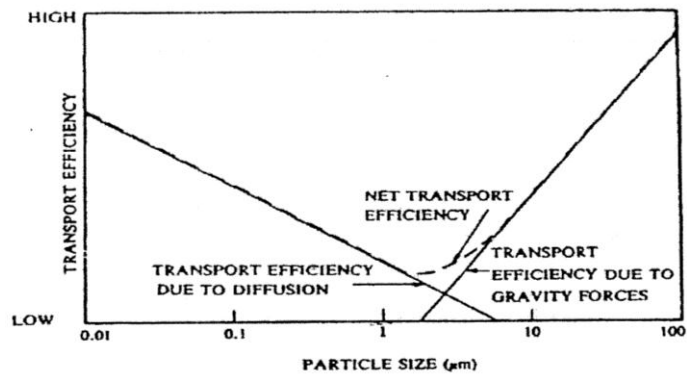
3) ตัวกรองที่เตรียมจากสารบางประเภทคือ Diatomaceous earth โดยนำมาใช้เคลือบผิวทำให้มีรูพรุนขนาดเล็ก เมื่อทำการกรองน้ำจะเกิดกระบวนการกรองคล้ายกับแผ่นกรอง

(2) กรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (in-depth filtration) คือวิธีการกรองน้ำแบบธรรมดาที่ใช้กันอยู่ทั่วไปสำหรับโรงงานผลิตน้ำประปา โดยสารกรองที่นิยมนำมาใช้ คือ ททราย แต่เพราะขนาดของสารกรองจะมีขนาดใหญ่กว่าวิธีการกรองแบบติดผิว ทำให้ตะกอนความขุ่นจึงมีโอกาสเข้าไปค้างในชั้นของสารกรองได้ สามารถแบ่งสารกรองได้หลากหลายชนิดตามลักษณะการกรอง อาทิเช่น แบ่งตามอัตราการกรอง แบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของสารกรอง แบ่งตามทิศทางการไหลของน้ำที่ผ่านสาร แบ่งตามชนิดของสารกรอง และแบ่งตามสภาพการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตัวกรอง

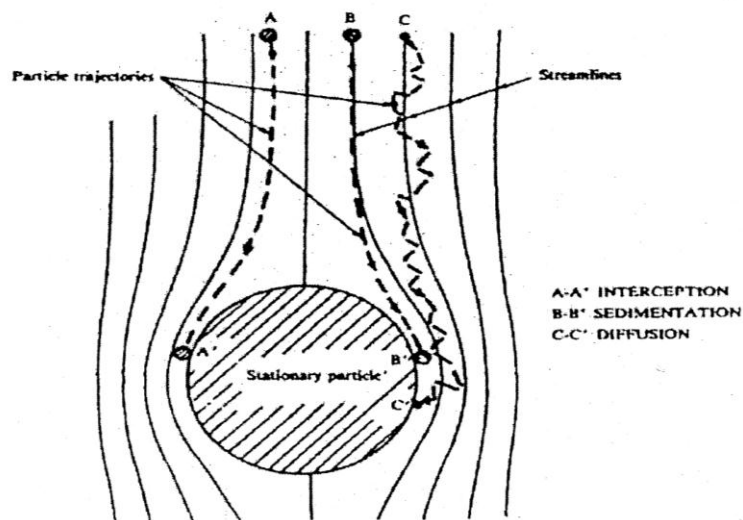
2.9.2 กลไกของการกรองน้ำ

กลไกการกรองของน้ำประปาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน (มันลิน, 2539) คือ

1. กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าสู่ตัวกรอง (transport mechanism) สารแขวนลอยสามารถเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ 2 ลักษณะด้วยกัน ลักษณะแรกสำหรับสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เป็นการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลเกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (brownian diffusion) โดยอาศัยแรงจากการแพร่ (diffusion force) ส่วนลักษณะที่สองสำหรับสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะมีการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ แล้วเกิดการวิ่งเบียดกันเข้าสู่ตัวกรอง (interception) ในระหว่างที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก สามารถสรุปได้ว่า การกระจายตัวและขนาด (size distribution) ของตัวกรองมีความสำคัญมากต่อกลไกในการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน การแพร่กระจายจะเป็นปัจจัยที่ทำให้สารแขวนลอยมีโอกาสเข้าสู่ตัวกรองได้มากกว่า แต่ที่สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน น้ำหนักและขนาดสารแขวนลอยจะมีอิทธิพลสำคัญในการสร้างกลไกการติดค้างและการตกตะกอน ดังภาพที่ 2.16 และ 2.17

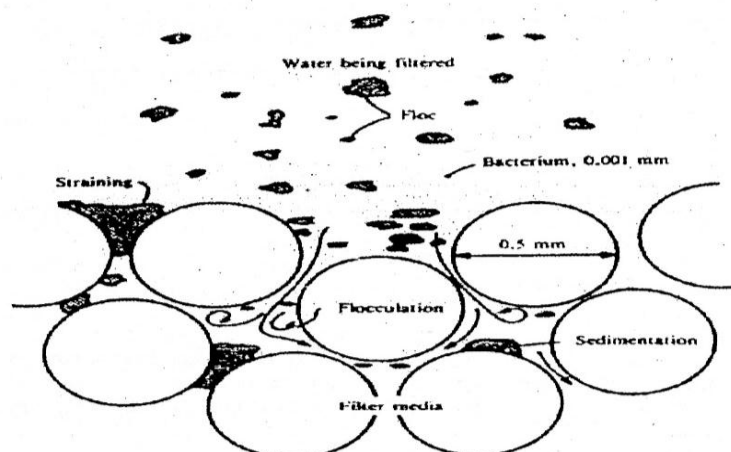


ภาพที่ 2.16 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นกับขนาด
ที่มา: Yao (1971)



ภาพที่ 2.17 กลไกในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาตัวกรอง
ที่มา: Yao (1971)

2. กลไกการจับสารแขวนลอย (attachment mechanism) สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่อาจมีการตกตะกอนและติดค้างอยู่บนตัวกรอง หรือติดอยู่ในช่องว่างระหว่างตัวกรอง ซึ่งสามารถทำให้กรองสารแขวนลอยออกจากน้ำได้ อีกทั้งยังสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กได้อีกด้วย โดยอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในระบบการรวมและตกตะกอน (coagulation) คือ การดูดซับและการทำลายประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์ให้มีประจุเป็นกลาง (charge neutralization) ซึ่งกลไกการดูดซับเป็นกลไกที่สำคัญในการทำให้คอลลอยด์สามารถเกาะติดบนตัวกรอง หรือสิ่งอื่นที่จับอยู่บนตัวกรองอยู่ก่อน ดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กลไกการกรองน้ำสำหรับเครื่องกรองทรายแบบเร็ว

ที่มา: Yao (1971)

ผลที่เกิดจากการกรองน้ำโดยอาศัยกลไกทั้ง 2 ชนิดจะแตกต่างกัน การติดค้างและการตกตะกอน เป็นกลไกทางกายภาพจะเกิดที่บริเวณผิวหน้าของชั้นกรองหรือที่ความลึกไม่เกิน 2 ถึง 3 นิ้วจากผิวหน้า เกิดการสูญเสียความเร็วน้ำ โดยที่เครื่องกรองน้ำคุณภาพดีจะมีการทำงานของกลไกทั้ง 2 ชนิด เพื่อให้การกรองเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ เกิดการกรองอย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงชั้นกรอง

2.9.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกรองน้ำ

1) การเตรียมน้ำก่อนที่จะนำมากรอง (pretreatment) ในการกรองน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง จะทำให้น้ำที่ผ่านการกรองไม่ใสเท่าที่ควรทั้งที่ใช้การกรองในอัตราที่ต่ำมาก เนื่องจากโอกาสในการเกาะติดและสัมผัสกันมีไม่มากนัก เพราะฉะนั้นในขั้นตอนการเตรียมน้ำก่อนที่นำมากรองจึงมีความสำคัญต่อการกรองน้ำเป็นอย่างมาก

2) ขนาดของสารกรอง ขนาดของสารกรองหรือตัวกรองเป็นพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการกำหนดความสามารถหรือสมรรถนะของเครื่องกรอง ถ้าหากมีการใช้สารกรองที่มีขนาดเล็ก ดังเช่น ทราย จะทำให้ผลิตน้ำ ที่มีคุณภาพสูง แต่อายุการใช้งานน้อย ในปัจจุบันจึงมีการคิดค้นใช้สารต่างๆ (filter aid) อาทิเช่น โพลีเมอร์ หรือสารส้ม ซึ่งจะช่วยให้ทำการกรองสารขนาดใหญ่ได้ และยังสูญเสียเฮดต่ำอีกด้วย

3) คุณภาพของน้ำดิบโดยน้ำดิบที่นำมาทำการกรองจะเป็นตัวชี้ว่าจะต้องทำการเตรียมน้ำดิบการนำมากรองหรือไม่ โดยทั่วไปถ้าน้ำดิบมีค่าความขุ่นไม่เกิน 20 ถึง 25 หน่วยความขุ่นสามารถนำมาใช้กรองได้ตรง แต่ถ้าหากมีค่าความขุ่นมากกว่านั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนที่จะนำไปกรอง

4) ความหนาของชั้นกรอง ระดับความหนาของชั้นกรองหรือตัวกรองเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่สุด ซึ่งจะกำหนดโอกาสในการสัมผัสระหว่างตัวกรองและสารแขวนลอย โดยจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการกรอง เพราะฉะนั้นขั้นตอนการเตรียมน้ำดิบสำหรับการกรองจึงเป็นการใช้ประโยชน์ได้ตลอดทั้งความลึกของตัวกรอง

2.9.4 ประสิทธิภาพของการกรอง

โดยปกติแล้วเครื่องกรองจะมีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดทั้งของแข็งและสารละลายแขวนลอยที่ตกค้างอยู่ในน้ำ สารหลากหลายชนิดที่มีความสกปรก อาทิ แบคทีเรียสาหร่าย ไวรัสความขุ่น สังกะสี และเหล็กที่ถูกออกซิไดซ์แล้ว หรือสารเคมีที่มีการเติมลงไปก่อนหน้าการกรอง การกรองน้ำเป็นกรรมวิธีการบำบัดที่มีกระบวนการทั้งทางด้านกายภาพและเคมี ซึ่งจะอยู่ได้อิทธิพลของตัวแปรหลายชนิด ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของน้ำที่ไหลผ่านเข้าเครื่องกรอง และตัวแปรอีกส่วนหนึ่งคือตัวของเครื่องกรองเอง

ความสามารถของการกรอง (filtrability) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากกว่าปัจจัยด้านอื่นๆ และมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติต่างๆ ของคอลลอยด์และสารแขวนลอยที่ตกค้างในน้ำ โดยที่ความสามารถในการกรองอาจทำการปรับปรุงหรือเพิ่มคุณภาพได้โดยการเพิ่มสารเคมีชนิดต่างๆ ลงไป ได้แก่ โพลีอิเล็กโทรไลต์ หรือโคแอกกูแลนต์ ซึ่งจะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำก่อนที่จะนำไปทำการกรอง

คุณสมบัติของตัวกรองหรือสารกรองในเครื่องกรองน้ำที่จะมีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องกรอง คือ รูปร่างและขนาดของสารกรอง การเรียงตัวของชั้นกรอง ความพรุนของตัวกรอง ความลึกของชั้นกรอง การสูญเสียความดันในชั้นกรอง ซึ่งโดยทั่วไปประสิทธิภาพของถังกรองจะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของสารกรองที่เล็กลง ความพรุนที่ลดลงหรือความลึกที่เพิ่มมากขึ้น

2.10 การดูดซับ

การดูดซับหรือที่เรียกอีกอย่างว่าการดูดติดผิว (adsorption) เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของไหล ได้แก่ ของเหลวและก๊าซ ระหว่างพื้นที่ผิวบนของแข็งและตัวของของไหล มีการนำกระบวนการดูดซับไปประยุกต์ใช้งานทางด้านต่างๆ หลากหลายประเภท ทั้งในส่วนของการอุตสาหกรรมและการบำบัดทางด้านสิ่งแวดล้อม กระบวนการดูดซับจะมีความเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารในบริเวณที่พื้นผิวมีการสัมผัสกับสาร ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้ยังสามารถเกิดขึ้นได้กับผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะ ได้แก่ ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของเหลว สำหรับอนุภาคที่ถูกดูดซับติดผิวเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับถูกเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งสารดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์, Adsorbent resins, Metal oxides, Ion exchange resins, Clays, Activated alumina, Hydroxides and carbonates และวัสดุหรือสารที่เป็นของแข็งชนิดอื่นๆ ที่มีการสัมผัสหรือแขวนลอยอยู่กับน้ำ (อิธิชัย นพแก้ว, 2539)

กระบวนการดูดซับมีบทบาทสำคัญอย่างมากสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำเนื่องมาจากความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งสารเหล่านี้เป็นต้นเหตุของสี กลิ่น สารพิษและเชื้อโรคชนิดต่างๆ ในการเกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์ทั่วไปตามธรรมชาติจะนิยมนำ Ion exchange resins และ Adsorbent resins มาใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ อีกทั้งยังมีบทบาทมากในกระบวนการผลิตน้ำประปา เนื่องจากสารดูดซับกลุ่มนี้มีความสามารถในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งสารเหล่านี้ไม่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีตกตะกอนหรือการกรองแบบธรรมดา ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการใช้ดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นต้นเหตุของสี กลิ่นและสารอันตรายหลากหลายชนิด ตัวอย่างเช่น อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งที่เกิดจากการรวมตัวกันในขั้นตอนการรวมตะกอน ความสามารถดูดติดผิวสีที่เกิดจากโมเลกุลและสารประกอบจากปฏิกิริยาของคลอรีนกับไตรฮาโลมีเทน หรือกลุ่มยาฆ่าแมลงที่สามารถถูกดูดซับในเม็ดดินเหนียว เป็นต้น (Frederick, 1990)

2.10.1 กลไกในการดูดซับ

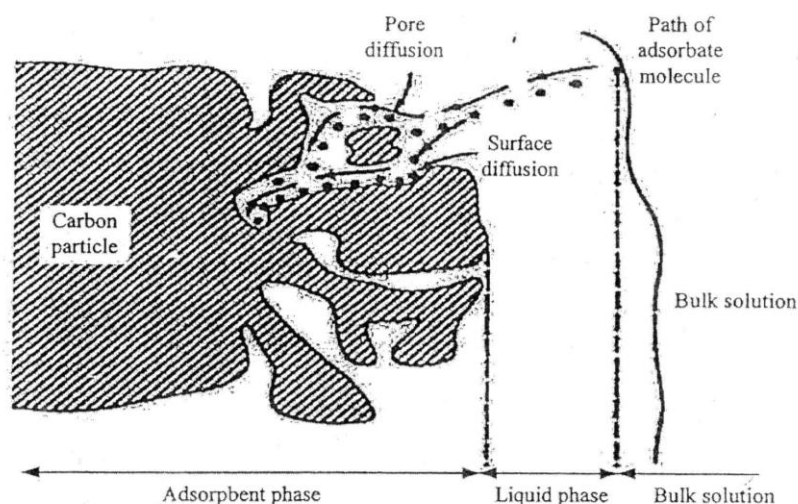
กระบวนการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์เกิดขึ้นจากแรงรวมตัวหรือ Bonding force หลายชนิด โดยเกิดขึ้นระหว่างบริเวณพื้นที่ผิวของคาร์บอนกับโมเลกุลของสารอินทรีย์ โดยที่แรงทุกแรงมีที่มาจากแรงร่วมกันระหว่างแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interaction) ดูดซับที่

สำคัญสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ 1) การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) โดยเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงอ่อนๆ ระหว่างโมเลกุล และ 2) การดูดซับทางเคมี (chemisorption) ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของพื้นผิวของของแข็งที่นำมาเป็นวัสดุดูดติดผิวกับตัวที่ถูกดูดซับโดยที่การดูดซับทั้ง 2 รูปแบบเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลที่อยู่ในชั้นของเหลวมีการเคลื่อนที่เข้าใกล้และถูกยึดติดอยู่บนบริเวณผิวของของแข็ง ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง มีความแข็งแรงสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลว ซึ่งความแตกต่างระหว่างกระบวนการดูดซับแบบทางกายภาพและทางเคมี สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ (Faust และ Aly, 1987)

(1) กระบวนการดูดซับทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ และเกิดขึ้นช้าเพราะต้องอาศัยการแพร่จากตัวถูกดูดไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับกระบวนการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นแบบไม่จำเพาะเจาะจงกับบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับสามารถเกิดทั่วทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพราะโมเลกุลของตัวถูกดูดมีความสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้

(2) กระบวนการดูดซับทางเคมี เป็นกระบวนการที่มีการสร้างพันธะทางเคมีขึ้นระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับโดยเมื่อกระบวนการนี้ได้เกิดขึ้นแล้วจะเกิดการผันกลับได้ยากกว่า กระบวนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นจำเพาะเจาะจงกับพื้นผิวหรือบริเวณที่เป็นลักษณะเฉพาะดังแสดงในภาพที่ 2.19

ลักษณะสำคัญที่เกิดเฉพาะกับการดูดซับทางเคมีคือ การเกิดปฏิกิริยานำมาซึ่งความร้อนที่สูง จากพันธะเคมีที่เกิดขึ้นมา ดังเช่น การเกิดสนิมแม่เหล็ก ซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน การหมุนตัวของอิเล็กตรอน พันธะเคมีที่เกิดจากการรวมตัวของสารถูกดูดซับและสารดูดซับซึ่งพันธะเคมีเป็นตัวที่ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย (Faust และ Aly, 1987)



ภาพที่ 2.19 ขั้นตอนในการเคลื่อนย้ายของสารดูดซับไปยังสารถูกดูดซับ

ที่มา: Montgomery (1985)

กระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาล (van der waals force) คือเกิดจากการรวมกันระหว่างแรง 2 ชนิด ได้แก่ แรงกระจาย (indon dispersion force) กับแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) โดยที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเกิดการยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับซึ่งรูปแบบการดูดซับชนิดนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayered) สามารถอธิบายได้ว่า ในแต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่ด้านบนของชั้นที่ถูกดูดซับก่อนหน้า และจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับหรืออธิบายได้ว่าจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น เพราะฉะนั้นกระบวนการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นกับปัจจัยหลากหลายปัจจัย อาทิ การเหนี่ยวนำ (induction) การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (orientation) และการกระจายตัว (dispersion) แรงดึงดูดของโมเลกุลที่มีขั้วจะเกิดมาจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งแรงดึงดูดเหล่านี้เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วของโมเลกุล ได้แก่ ขั้วบวกและขั้วลบ โดยขั้วบวกของโมเลกุลหนึ่งจะเกิดการดึงดูดกับขั้วลบของอีกโมเลกุลหนึ่ง แต่สำหรับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้น ขั้นตอนการดูดซับจะเกิดขึ้นในรูปแบบการกระจายตัวหรือเกิดจากการสั่นของอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียสของอะตอม เป็นเหตุให้พลังงานของระบบลดลงระบบจึงมีความเสถียรมากขึ้น โมเลกุลจึงสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้ (อิทธิชัย นพแก้ว, 2539)

2.10.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

พื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับซึ่งเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับซึ่งกลไกของกระบวนการดูดซับภายนอกของสารดูดซับที่ไม่มีโพรง จะมีอัตราดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2. ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ

ความสามารถในการละลายน้ำได้ของสารถูกละลายเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโดยการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายของสารถูกดูดซับที่อยู่ในตัวทำละลายลดลง เพราะว่าในขั้นตอนการดูดซับสารที่ถูกดูดซับและตัวทำละลายจะต้องถูกแยกออกจากกัน ซึ่งในที่นี้ น้ำเป็นตัวทำละลาย สารถูกดูดซับที่มีความสามารถละลายน้ำได้หรือแตกตัวออกเป็นไอออนอิสระได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงมาก ทำให้ยากต่อการดูดซับเพราะฉะนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายแต่ละลายได้น้อยจึงสามารถดูดซับได้ดี ไม่เพียงแต่ความสามารถในการละลายเท่านั้น ขนาดโมเลกุลของสารดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการดูดซับอีกด้วย ถ้าอัตราเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ทำหน้าที่ควบคุมกลไกแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารละลายจะแปรผกผันกับความสามารถในการดูดซับ

3. อุณหภูมิ

โดยทั่วไปแล้วการดูดซับติดผิวเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic) (Weber, 1972) เพราะฉะนั้นความสามารถในการดูดซับจึงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดซับก็จะลดลง ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับก็จะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้น ไม่เพียงเท่านั้นอุณหภูมียังมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยอุณหภูมิจะไปเปลี่ยนความสามารถในการละลายของสาร ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น เป็นผลให้ความสามารถการดูดซับลดน้อยลง

4. ค่าความเป็นกรด – เป็นด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นอีกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับเพราะไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออน สามารถถูกดูดซับได้อย่างค่อนข้างแข็งแรง เป็นเหตุให้การดูดซับ

ไอออนชนิดอื่นมีผลกระทบจากค่าความเป็นกรด-ด่าง อีกทั้งค่าความเป็นกรด-ด่างยังมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายน้ำของสารหลากหลายชนิดและการแตกตัวของไอออนอีกด้วย

5. ความปั่นป่วน

การแพร่ภายนอกและการแพร่ภายในมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วในการดูดซับ ซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบอีกด้วย ถ้าภายในน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดติดผิวอยู่จะมีความหนาแน่นมากและทำให้เกิดเป็นอุปสรรคในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ เพราะฉะนั้นการแพร่ภายนอกจึงเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วในการดูดซับแต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าหากความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ เป็นเหตุให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับความปั่นป่วนภายในถึงดูดซับหมายถึงความเร็วของน้ำที่ผ่านลงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัด โดยตามทฤษฎีแล้วถ้ามีการเพิ่มความเร็วก็จะทำให้ความปั่นป่วนสูงขึ้น

6. ระยะเวลาสัมผัส

สำหรับกรณีของถังดูดซับแบบคอลัมน์ ระยะเวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับและอายุการใช้งานของถัง โดยถ้าระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับลดลง จะทำให้อายุการใช้งานของของถังดูดซับแบบคอลัมน์นานยิ่งขึ้น แต่ระยะเวลาในการสัมผัสมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มมากขึ้น จนเลยช่วงที่เหมาะสมไปแล้ว ระยะเวลาสัมผัสแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอีก

2.10.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

ในการดูดติดผิวของสารประกอบที่เป็นของเหลวไปยังตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ มีความจำเป็นที่จะต้องทราบอัตราเร็วการดูดซับเพื่อจะนำไปใช้สำหรับการออกแบบระบบ ทั้งแบบคอลัมน์และแบบแบต (batch reactor) รวมไปถึงการออกแบบโมเดล อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลได้เร็วยิ่งขึ้น กระบวนการในการดูดซับจากสารละลาย โดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 4 ขั้นตอนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกัน ดังต่อไปนี้

1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk fluid transport) โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปยังบริเวณผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับอยู่ แต่ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถเห็นชั้นฟิล์มที่อยู่รอบๆ เม็ดคาร์บอนได้ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นได้เร็วที่สุด

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) ขั้นตอนนี้โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลว บางๆ มีการแทรกตัวเข้าสู่บริเวณผิวหน้าของสารดูดซับโดยขั้นตอนการขนส่งชั้นฟิล์มเป็น กระบวนการที่เกิดขึ้นจากการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม เป็นเหตุให้การเคลื่อนที่เป็นไปได้ช้ากว่าการ เคลื่อนที่ทั้งก้อน

3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle หรือ pore diffusion) เป็นกระบวนการ แพร่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าไปสู่รูหรือโพรงของสารดูดซับทำให้ในบริเวณนั้นมีการดูดซับ เกิดขึ้น โดยการเคลื่อนที่ประเภทนี้เป็นไปอย่างช้าๆ

4) การเกาะติดทางกายภาพ (actual physical attachment) เป็นกระบวนการ เคลื่อนที่ของของเหลวเข้าไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับจนได้เป็นแรงทางกายภาพ โดยเป็นแรง ที่มีการเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างรวดเร็ว ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นมีดังต่อไปนี้ แรงแวนเดอร์วาล แรงไฟฟ้าสถิต พันธะไฮโดรเจน

2.11 การฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เมื่อผ่านการใช้งานไปสักระยะ บริเวณรูพรุนของเมล็ดถ่านจะถูกอุดตันไปด้วย โมเลกุลของสิ่งสกปรก ซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้ถ่านเสื่อมประสิทธิภาพ ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุดูดซับที่มี ราคาสูง เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายจึงมีการนำถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้วในการดูดซับ (exhausted carbon) มาทำการฟื้นฟูเพื่อที่จะสามารถนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้งานได้อีก ซึ่ง วิธีการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์โดยการนำไปกำจัดโมเลกุลที่ตกค้างอยู่ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์นั้น มีมากมายหลายวิธี อาทิเช่น (Lyman, 1987)

2.11.1 การฟื้นฟูสภาพโดยใช้ความร้อน (Thermal reactivation) เป็นวิธีการฟื้นฟูสภาพ ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด โดยถ่านกัมมันต์ที่เสื่อมประสิทธิภาพแล้วจะรวมอยู่กับน้ำที่มีลักษณะ ชื้น (slurry) หลังจากเข้ามาสู่ระบบฟื้นฟูสภาพจะทำการแยกน้ำออกจากถ่าน (dewater) ออกจาก ตัวถ่านกัมมันต์ จากนั้นจึงส่งเข้าเตาเผาที่เรียกว่า Rotary kiln หรือ Multiple heat furnace จะเกิด การเผาด้วยอุณหภูมิระหว่าง 870 ถึง 980 องศาเซลเซียส ซึ่งในขณะที่เกิดการเผาถ่านกัมมันต์จะ ถูกทำให้แห้งและการเผาไหม้จะทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ตกค้างอยู่ในบริเวณผิวหน้าหรือในรู พรุนของถ่านกัมมันต์ระเหยกลายเป็นไอและสลายตัว ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องมีการควบคุมปริมาณ ออกซิเจนเนื่องจากออกซิเจนจะทำลายเนื้อของถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff and Morresi, 1987) หลังจากนั้นถ่านกัมมันต์จะถูกทำให้เย็นลงโดยการนำไปแช่น้ำ (Quenching) แล้วจึงนำไปล้างเพื่อ

แยกเถ้าและผงของถ่านกัมมันต์ออก แล้วสูบเพื่อนำกลับไปใช้งานหรือเก็บไว้ ในกระบวนการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ด้วยการให้ความร้อนจะใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาทีและสูญเสียพลังงานประมาณ 4,000 ถึง 5,000 บีทียูต่อถ่านกัมมันต์หนึ่งปอนด์ แล้วในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการฟื้นฟูถ่านกัมมันต์จะสูญหายไปประมาณ 4 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์

2.11.2 การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (stream regeneration) วิธีการนี้ นิยมใช้กับตัวดูดซับที่เป็นไอได้ง่าย

2.11.3 การใช้ตัวทำละลายในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (solvent regeneration) การใช้ตัวทำละลายนิยมใช้กับตัวดูดซับที่เป็นกลุ่มสารอินทรีย์

2.11.4 การใช้กรดในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (acid regeneration) นิยมใช้กับตัวดูดซับหรือสภาวะที่ใช้ในการดูดซับเป็นด่าง

2.11.5 การใช้ด่างในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ (alkaline regeneration) นิยมใช้กับตัวดูดซับหรือสภาวะที่ใช้ในการดูดซับเป็นกรด

2.12 ถึงดูดซับแบบท่อ

การทดลองแบบชั่วคราวที่ทำให้เราทราบถึงผลลัพธ์จากการดูดซับด้วยถ่านว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่คือขั้นตอนการหาไอโซเทอม ซึ่งได้ข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับนำมาใช้ออกแบบระบบบำบัดด้วยวิธีการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ การทดลองแบบต่อเนื่องจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาทำโดยการใส่ท่อขนาดเล็กแทนถังในระบบบำบัด ซึ่งน้ำเสียจะไหลผ่านถ่านที่อยู่ในท่อ ระบบดูดซับจะเริ่มขึ้นโดยจะเริ่มดูดซับบริเวณส่วนบนของถังดูดซับแบบท่อก่อน จากนั้นบริเวณที่มีการดูดซับจะค่อยๆ เลื่อนลงไปด้านล่าง จนการดูดซับเกิดทั่วทั้งถัง จนเกิดลักษณะหมดสภาพของถ่านกัมมันต์ที่บริเวณก้นถัง ดังแสดงในภาพที่ 2.20 เพราะเหตุนี้ ความเข้มข้นของสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเมื่อผ่านการดูดซับแล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำเสียหรือเวลา จนสุดท้ายแล้วค่าความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่นำมาไหลผ่านถึงดูดซับแบบท่อจะมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นของน้ำที่เข้าระบบ

เส้นโค้งเบรคทวร์จ์ หรือ Breakthrough curve เป็นเส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าความเข้มข้นสารที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งหลังจากกรองผ่านชั้นถ่านกัมมันต์กับค่าความเข้มข้นเริ่มต้น โดยเทียบกับปริมาณน้ำที่นำมาผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ ในจุดที่การดูดซับของถ่าน

กัมมันต์เสื่อมประสิทธิภาพ จะเรียกว่าจุดเริ่มหมดสภาพ หลังจากจุดนี้จะกราฟเป็นเส้นตรงที่ยกสูงขึ้น นั่นคือประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านค่อยๆ ลดน้อยลง ที่สุดแล้วถ่านกัมมันต์จะหมดสภาพ คือไม่สามารถที่จะดูดซับหรือนำมาใช้บำบัดได้อีก ในกราฟเส้นโค้งเบรคทวร์จที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 บริเวณที่จุด C_E เรียกว่า Breakthrough point หรือจุดหมดสภาพ และระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นมีการดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพเรียกว่า Breakthrough time ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับหรือการบำบัด คือ

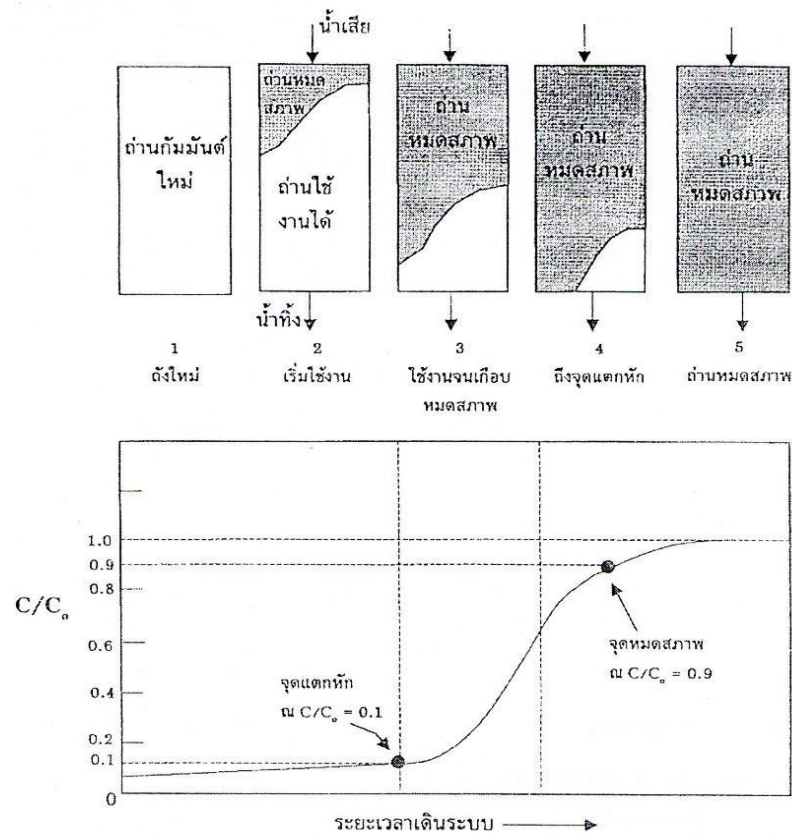
1) ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่นำมาบำบัด เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นให้สูงขึ้น จะทำให้ปริมาตรหรือเวลาน้ำที่ผ่านถึงดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพจะลดลง

2) ขนาดของสารดูดซับหรือตัวกลางที่อยู่ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ ถ้ามีการเพิ่มขนาดของตัวกลาง จะทำให้ปริมาตรหรือเวลาน้ำที่ไหลผ่านถึงดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพจะลดลง

3) อัตราการไหลของน้ำในถังดูดซับเมื่ออัตราการไหลเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ปริมาตรหรือเวลาน้ำที่ไหลผ่านถึงดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพจะลดลง

4) ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลาย เมื่อค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้น จะทำให้ปริมาตรหรือเวลาน้ำที่ไหลผ่านถึงดูดซับจนถึงจุดหมดสภาพจะลดลงสำหรับตัวถูกละลายเป็นสารที่แตกตัวในน้ำได้ไม่มาก

ปัจจัยที่กล่าวมาเป็นเงื่อนไขในกรณีที่กราฟเส้นโค้งเบรคทวร์จ อยู่ในรูปตัว S แต่ถ้าหากนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง หรือน้ำที่มีสารที่มีดูดซับมากกว่าหนึ่งชนิด หรือสารละลายมีไอออน จะมีปัจจัยชนิดอื่นที่มามีอิทธิพลในการกำหนดรูปแบบของเส้นโค้งเบรคทวร์จ อาทิ การแทนที่การดูดติดผิวที่ไม่มีประสิทธิภาพด้วยตัวดูดซับที่ดีกว่า การแข่งขันการดูดซับซึ่งจะทำให้เส้นโค้งเบรคทวร์จไม่มีรูปร่างเป็นตัว S



ภาพที่ 2.20 รูปแบบการหมดสภาพของถังดูดซับ

ที่มา: เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2548

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Andrew et al. (1981) จุลินทรีย์ที่สำคัญที่พบปนเปื้อนในน้ำผิวดินจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในทางเดินอาหารซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้อาจมีการปนเปื้อนมากับสิ่งขับถ่ายหรือสิ่งปฏิกูล จุลินทรีย์ปนเปื้อนที่สำคัญคือจุลินทรีย์กลุ่มโคลิฟอร์ม เป็นจุลินทรีย์ที่รวมแบคทีเรียกลุ่ม aerobic และ facultative anaerobic แกรมลบ ไม่สร้างสปอร์ และสามารถดำเนินกิจกรรมหมักน้ำตาล lactose ได้ โดยเมื่อก้าวถึงจุลินทรีย์กลุ่ม coliform นี้ก็จะก้าวรวมถึงกลุ่ม enterobacter สามารถพบจุลินทรีย์ชนิดนี้ได้ตามพื้นดิน แหล่งน้ำสกปรก พืช สัตว์ และมนุษย์

Nataro and Kaper (1998) *E. coli* เป็นจุลินทรีย์กลุ่ม facultative anaerobe genus Escherichia family Enterobacterales ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของมนุษย์โดยอยู่ในผนังลำไส้ มีลักษณะเซลล์เป็นแท่ง แกรมลบ โดยปกติเมื่ออยู่ในลำไส้ของมนุษย์จะไม่ทำให้เกิดโรค การติดเชื้อของจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถแพร่กระจายไปได้ทุกส่วนของร่างกาย

Utrilla, R.J. (2001) การบำบัดน้ำโดยการดูดซับจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการพัฒนาโดยการเติม cation จำพวก Fe^{3+} Ca^{2+} Mg^{2+} เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับพิษ โดยทำให้ ถ่านกัมมันต์มีประจุบวกรวมเป็นบวกเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับจุลินทรีย์ที่ประจุบวกรวมเป็นลบ ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับระบบบำบัดน้ำดื่ม นอกจากการใช้ประโยชน์จาก ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับจุลินทรีย์แล้ว ถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับจุลินทรีย์ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้ในการดูดซับตะกั่วไปพร้อมกันได้อีกด้วย เนื่องจากผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดซับจุลินทรีย์ไว้ที่ผิวแล้ว ประจุบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์จะเป็นลบมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับตะกั่วได้ดี

Upadhyayula, V.K.K. (2009) งานวิจัยทดสอบการดูดซับสปอร์ *Bacillus subtilis* บนวัสดุดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ Single-walled carbon nanotube aggregates, Activated carbon และ Nano CeramTM ความสมดุลและพลังงานจลน์ของความสามารถในการดูดซับสปอร์ของ *Bacillus subtilis* บน Single-walled carbon nanotube aggregates ใช้สำหรับตรวจสอบความเข้มข้น, การตรวจหาและการกำจัดจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ วิธีการดูดซับแต่ละครั้งจะดำเนินการด้วยพลังงานจลน์ในการดูดซับระหว่างจุลินทรีย์กับถ่านกัมมันต์ ข้อมูลของพลังงานจลน์ในการดูดซับระหว่างจุลินทรีย์กับถ่านกัมมันต์ถูกวิเคราะห์ด้วยโมเดลทั้ง 2 โมเดล คือ Lagergren pseudo first order และ A pseudo second order ข้อมูลของความสมดุลในการดูดซับบนตัวกลางรูพรุนถูกหาได้ด้วยสมการค่าคงที่ของเฮนรีซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลพลังงานจลน์ในการดูดซับได้เป็นอย่างดี การคำนวณค่าคงที่ของอัตราการดูดซับผันแปรกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดเข้าไป ค่าคงที่ของเฮนรีของสมดุลของการดูดซับสปอร์ของ *B. subtilis* บน Single-walled carbon nanotube aggregates สูงกว่าบน Activated carbon และ Nano CeramTM ซึ่งความสัมพันธ์ของการดูดซับของ Carbon nanotube กับสปอร์ของ *B. subtilis* เป็นไปอย่างเหมาะสมกับ Carbon nanotube โดย Carbon nanotube มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลาง สปอร์ของ *B. Subtilis* ถูกดูดซับได้ง่าย รวมถึงลักษณะที่เป็นเส้นใยเหมาะสำหรับการดูดซับสปอร์ของ *B. subtilis* และพื้นที่ผิวเฉพาะที่มีลักษณะคล้าย graphite ทำให้ได้เปรียบในด้านการดูดซับสปอร์ของ *B. subtilis* ดังผลที่เสนอนี้ Carbon nanotube จึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดที่คัดเลือกคล้ายกับเป็น Biosensors และเป็นตัวกลางดูดซับความเข้มข้น, การค้นหาและการกำจัดเชื้อโรคสำหรับแหล่งน้ำที่ปนเปื้อนจุลินทรีย์

Busscher, H.J. (2008) งานวิจัยเรื่องแรงดึงดูดระหว่างจุลินทรีย์ก่อโรครักกับถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์นำมากำจัดจุลินทรีย์ตัวก่อโรคติดต่อทางน้ำ สำหรับระบบน้ำดื่ม โดยจุลินทรีย์และ

ถ่านกัมมันต์จะยึดติดกันผ่านแรง Lifshitz-van der Waals โดยไม่คำนึงถึงแรงไฟฟ้าระหว่างเซลล์
 ประจุลบบนผิวจุลินทรีย์และประจุบวกบนพื้นผิวดคาร์บอน ในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยได้บอกจำนวน
 แรงภายในระหว่างจุลินทรีย์กับประจุลบและประจุบวก, รูปทรงขนาดกลางของถ่านคาร์บอนที่เตรียม
 จากไม้ และเหมือนกันในถ่านคาร์บอนที่เตรียมจากกะลามะพร้าว สุดท้ายการยึดติดอนุภาค
 คาร์บอนเข้ากับส่วนที่เป็นแขนยื่นออกมาของแรง atomic ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์และการตรวจวัดแรง
 ภายในไปจนถึงแรงดึงดูดและแรงผลักของจุลินทรีย์ที่อยู่อาศัยในน้ำได้แก่ *Raoultellaterrigena* และ
E. coli ซึ่งเกาะติดได้น้อยมาก (1-2 nN) อนุภาคที่แตกต่างกันของถ่านกัมมันต์เป็นเปอร์เซ็นต์ของ
 เส้นโค้งกับแรงดึงดูด ที่แสดงให้เห็นบริเวณด้านข้างของอนุภาคถ่านกัมมันต์ผ่านชั้นแบคทีเรีย EPS
 และเปอร์เซ็นต์ของเส้นโค้งได้แสดงให้เห็นแรงยึดติดของแรงภายในแปรผันระหว่าง 21% และ 69%
 สำหรับ *Raoultellaterrigena* กับถ่านคาร์บอนซึ่งประจุบวกสูงสุด 66% และถ่านกัมมันต์ที่เตรียม
 จากกะลามะพร้าว 69% จุลินทรีย์ขนาดใหญ่จะถูกกำจัดโดยรูปทรงขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ โดย
 การเพิ่มขึ้นร่วมกับเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นบริเวณที่ถูกจุลินทรีย์ยึดเกาะบนชั้นผิวของถ่านกัมมันต์

Kim Hyon-Chong (2009) งานวิจัยการยึดติดของจุลินทรีย์บนถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมธาตุ
 เหล็ก iron-impregnated granular activated carbon (Fe-GAC) ถูกนำมาใช้ในการวิจัย ใช้
 จุลินทรีย์ *Enterococcus faecalis* ATCC 10100 และ charcoal-based GAC คอลัมน์ทั้ง 2 เซต
 ถูกดำเนินการภายใต้ความแตกต่างของค่า ionic strength และค่าความเป็นกรดเป็นด่าง
 Breakthrough curves ของแบคทีเรียได้มาโดยการตรวจวัดน้ำออกจากระบบ, การฟื้นฟูสภาพ
 ชีวมวลและอัตราการยึดติดระหว่างจุลินทรีย์กับถ่านกัมมันต์ ค่าสัมประสิทธิ์หาได้จาก
 Breakthrough curves นอกจากนั้นลักษณะของ FE-GAC ถูกวิเคราะห์โดยใช้ field emission
 scanning electron microscopy (FESEM) และ X-ray spectrometry (EDS) ผลแสดงให้เห็นว่า
 FE-GAC มีลักษณะ mosaic คล้ายชั้นเหล็กออกไซด์ หนาประมาณ 2 μm สี mapping with
 FESEM ทำให้มองเห็นช่องว่างการกระจายของคาร์บอน (เหลือง-เขียว) และเหล็ก (แดง)
 บน FE-GAC และ EDS ยังแบ่งแยกเหล็กชัดเจนโดยพบจาก FE-GAC ทั้ง 3 peek ผลก็ได้แสดงให้เห็น
 เห็นการยึดติดของจุลินทรีย์บน FE-GAC โดยถูกยึดติดด้วยอิทธิพลของ ionic strength และค่า
 ความเป็นกรดเป็นด่าง ชีวมวลที่ฟื้นฟูสภาพลดลงจาก 62.9% เหลือ 41.7% พร้อมกับการเพิ่มขึ้น
 ของค่า ionic strength จาก 1 เป็น 50 mM และจุลินทรีย์ที่ยึดติดบนพื้นผิวของ FE-GAC จะมีค่า
 สูงขึ้นด้วยการเพิ่มค่า Ionic strength เพราะเป็นการไปเพิ่มอัตราการยึดติดระหว่างจุลินทรีย์และ
 ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากค่า Ionic strength ไปทำให้ประจุบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ เปลี่ยนจาก
 ประจุลบ กลายเป็นประจุบวก สามารถยึดติดจุลินทรีย์ได้ง่ายขึ้นเนื่องจากประจุที่ผิวของจุลินทรีย์

เป็นประจุลบ ส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า pH จาก 6.46 ไปถึง 9.19 การเพิ่มสภาพชีวมวลเพิ่มขึ้นจาก 50.5% เป็น 84.2% การยึดติดของจุลินทรีย์ที่ FE-GAC จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่า pH เนื่องจาก iron oxide บน FE-GAC มีประจุเป็นบวกเล็กน้อย แต่ถ้าหากค่า pH สูงเกินกว่า 8 จะทำให้มีประจุลบเพิ่มขึ้น

Hijnen, W.A.M. (2009) งานวิจัยการใช้ถ่านกัมมันต์ (GAC) เพื่อดูดซับมลพิษขนาดเล็ก โดยใช้ในการกรองกับระบบบำบัดน้ำทั่วไป โดยวัตถุประสงค์ในการศึกษาเพื่อกำจัด Bacteriophage MS2, *Escherichia coli* และสปอร์ของ *Clostridium parvum* และ *Giardia lamblia* สำหรับเชื้อโรค และ (oo)cysts of *Clostridium parvum* และ *Giardia lamblia* โดยการทดลองจะทำการเปรียบเทียบระหว่าง fresh GAC และ loaded GAC โดยทำในระบบขนาดทดลอง ผลการทดลองไม่สามารถกำจัด Bacteriophage MS2 ได้และสามารถกำจัด *Escherichia coli* และสปอร์ของ *Clostridium parvum* และ *Giardia lamblia* ได้ โดยช่วงที่กำจัดได้คือ $\leq 0.1-1.1/\log$ และการกำจัด (oo)cysts of *Clostridium parvum* และ *Giardia lamblia* ผลที่กำจัดได้อยู่ในช่วง 1.3 – 2 ต่อ log โดยการทดลองได้วัดจากค่า Mass balance และ การคำนวณ CFT

สาวิตรี จันทรานุกรักษ์และคณะ (2549) งานวิจัยถ่านกัมมันต์จากก้านทะเลลายปาล์มน้ำมัน และการดูดซับเชื้อ *E. coli* การผลิตถ่านกัมมันต์จากก้านทะเลลายปาล์มน้ำมัน มีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ การคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 45 นาที และวิธีการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 180 นาที อัตราส่วนระหว่างสารละลาย KOH ต่อถ่านชาร์ คือ 1:1 ใช้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้คือ ความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.346 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 248 มิลลิกรัมต่อกรัมและค่าการดูดซับไอโอดีน 1308 มิลลิกรัมต่อกรัม สภาพะการทดลองคือน้ำตัวอย่าง 50 มิลลิลิตรต่อถ่านกัมมันต์จำนวน 1 กรัมมาทำการดูดซับ *E. coli* เป็นระยะเวลา 21 ชั่วโมง ด้วยกระบวนการแบบ Batch ผลการทดลองที่ได้คือ การดูดซับของ ถ่านกัมมันต์ก้านทะเลลายปาล์ม น้ำมันเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิช คือ $q_e = 0.9905c_e^{0.07}$ โดยที่ค่าฟังก์ชันความแข็งแรงในการดูดซับ (1/n) เท่ากับ 0.07 ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูง แสดงให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากเซลล์ของ *Escherichia coli* มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของถ่าน 100 เท่า

บทที่ 3

อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษานี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองที่ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการ 1705 ชั้น 17 หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมและห้องวิจัย ถ่านกัมมันต์ 329 ชั้น 3 ตึกเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุดิบ

ถ่านชาร์ที่ผลิตจากขี้เถ้ารวม ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ถ่านชาร์ขี้เถ้าที่ใช้สำหรับการทดลอง

3.1.2 อุปกรณ์

3.1.2.1 อุปกรณ์สำหรับกระตุ้นถ่านกัมมันต์

- เตาเผาให้ความร้อน (tube furnace) ชนิด 21100 ยี่ห้อ CARBOLITE
- ตู้อบ (oven) ยี่ห้อ Memmert
- ตะแกรงร่อนคัดขนาด (sieve) ขนาด 2.00 – 4.75 มิลลิเมตร
- โถดูดความชื้น (desiccator)
- เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ชนิด K

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
- นาฬิกาจับเวลา
- ครก
- ปั๊มดูดจ่ายสารละลาย (peristaltic pump)
- ชุดกระตุ้นแบบเบดนิ่ง เป็นลักษณะเตาให้ความร้อนแบบรีทอร์ต (retort) แนวตั้ง (vertical) สามารถปรับอุณหภูมิถึง 1,200 องศาเซลเซียส บริเวณตรงกลางจะเป็นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อใส่ตัวอย่างซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกกลม มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 เมตร ยาว 0.50 เมตร ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

3.1.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ

- หลอดทดลอง (test tube)
- ปีกเกอร์ (beaker) ขนาด 250, 500, 1,000, 2,000 มิลลิลิตร
- ขวดปรับปริมาตร (cylinders) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ช้อนตักสาร (spatula)
- แท่งแก้ว (stiring rod)
- สำลี (cotton)

- อลูมิเนียมฟอยล์ (foil)
- ปากคีบ (forceps)
- ขวดฉีดน้ำกลั่น (distilled water inject bottle)
- ตะเกียงแอลกอฮอล์ (alcohol lamp)
- ไมโครปิเปต (micropipette) ขนาด 1, 10 มิลลิลิตร
- แท่งเหล็กปลายเข็มสำหรับเขี่ยเชื้อ (needle)
- แท่งเหล็กปลายกลมสำหรับเขี่ยเชื้อ (loop)
- เครื่องปั่นผสม (vortex) ยี่ห้อ Shelton scientific รุ่น VSM – 3 mixer
- ตู้ปลอดเชื้อ Vertical Laminar Flow
- เครื่องเขย่าแนวราบ ยี่ห้อ GFL รุ่น 3016
- ตู้บ่มจุลินทรีย์ (incubator) ยี่ห้อ Memmert
- เครื่องนึ่งอบฆ่าเชื้อ (autoclave) ยี่ห้อ Tomy รุ่น 3225
- ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- ไม้สวอป (swab)
- หลอดดักก๊าซ (durham tube)
- ชุดกรองจุลินทรีย์
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV – Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ HACH
- กระดาษกรองแบบที่เรียกเซลลูโลส – ไนเตรต Whatman ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
- กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
- เครื่องวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Consort รุ่น C862

- เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Mettler Toledo



ภาพที่ 3.3 กระดาษกรองแบบที่เรียวยเซลลูโลส – ไนเตรต Whatman ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร

3.1.2.3 อุปกรณ์สำหรับการใช้ในการทดลองในถังกรองแบบแท่ง

- ถังกรองแบบแท่ง ใช้แท่งแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร

- จุกยาง
- แท่งแก้วนำก๊าซ
- สายยาง
- ปุ่มดูดจ่ายสารละลาย



ภาพที่ 3.4 ถังกรองแบบแท่ง

3.1.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope: SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LU Japan
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว (surface area analyzer) รุ่น BELSORP-mini, BEL

3.1.3 เคมีภัณฑ์

- Nutrient agar (NA)
- Nutrient broth (NB)
- Lauryl tryptose broth (LTB)
- Eosin methylene blue agar (EMB)
- โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
- โซเดียม ไดไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (NaH₂PO₄)
- ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (Na₂HPO₄)
- ผงวุ้น (agar)
- แอลกอฮอล์ (alcohol)
- ก๊าซไนโตรเจน 99.99 เปอร์เซ็นต์

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ ได้แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน คือขั้นตอนการเตรียมเชื้อ ขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนการกรองผ่านถึงกรองแบบแท่ง และขั้นตอนการวิเคราะห์เก็บผล

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมเชื้อ

การเตรียมเชื้อ *E. coli*

- 1) นำไม้สวอป (swab) ปาดเชื้อจากสายชำระในห้องน้ำ

2) จุ่มปลายสำลีไม้สวอป ลงในอาหาร Lauryl tryptose broth (LTB) ซึ่งมีหลอดดัก ก๊าซคว่ำอยู่

3) นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4) ดูผล ถ้าให้ผลเป็นบวกจะเกิดก๊าซใน Durham tube

5) Streak อาหารในหลอดที่ให้ผลเป็นบวก ลงใน Eosin methylene blue agar (EMB) เพื่อยืนยันผล นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง

6) ให้ผลเป็นบวกจะเกิดโคโลนีสี Metallic sheen

7) นำเชื้อที่ได้มา Streak มาลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ NA เพื่อเก็บไว้เป็นตัวอย่างเชื้อ

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเชื้อ *E. coli*

1) ใช้ห้วงเชื้อเชื้อ *E. coli* ออกจากจานอาหารแล้วลงไปจุ่มในหลอดทดลองที่มีน้ำกลั่น ปราศจากเชื้ออยู่

2) นำน้ำกลั่นที่ใส่เชื้อเข้าไปแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ 600 นาโนเมตร โดยวัดให้มีค่าเท่ากับ 1 เพื่อที่ค่าจำนวนจุลินทรีย์ในการ ทดลองจะคงที่ตลอดการทดลอง

3) นำน้ำกลั่นที่วัดค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 1 มาทำการเจือจางตัวอย่างด้วยวิธี serial dilution อัตราส่วนการเจือจาง 10^{-7}

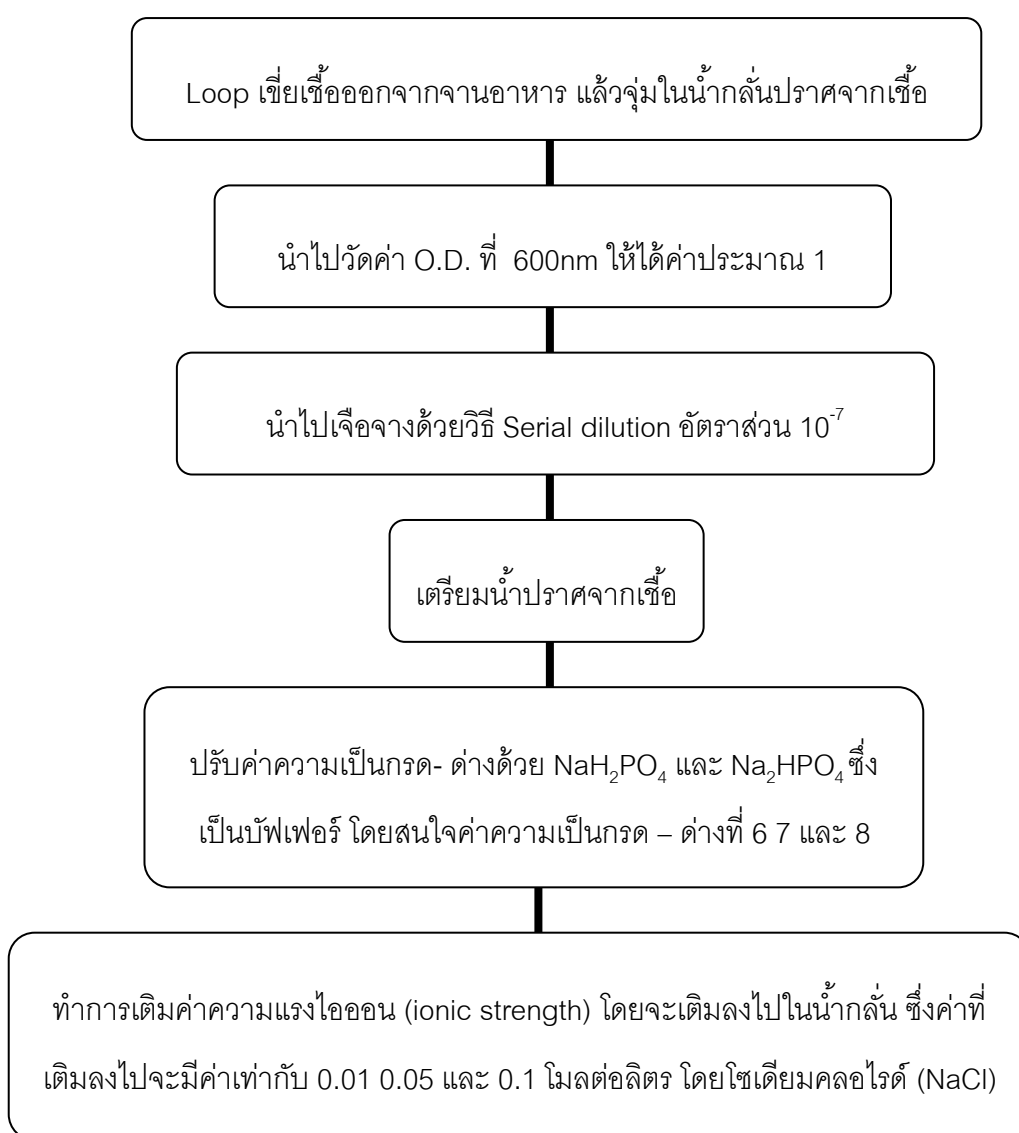
4) ทำการเตรียมน้ำ โดยปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างด้วยโซเดียม ไดไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียม ไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นบัฟเฟอร์ โดยสนใจศึกษาค่าความเป็นกรด – ด่างที่ 6, 7 และ 8

5) เตรียมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เพื่อทำการเติมค่าความแรงไอออน (ionic strength) โดยจะเติมลงไปใต้น้ำกลั่นที่ผ่านการปรับค่าความเป็นกรด – ด่างมาแล้ว ซึ่งค่าที่เติมลงไปจะมีค่า เท่ากับ 0.01 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งเป็นค่าที่สนใจศึกษา

6) เมื่อได้น้ำที่มีค่าความเป็นกรด –ด่าง และค่าความแรงไอออนที่ต้องการแล้ว นำน้ำมาทำการฆ่าเชื้อโรคโดยการนึ่งด้วยเครื่องนึ่งอบฆ่าเชื้อ (autoclave) ที่ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

7) เทเชื้อลงไปในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากเชื้อที่มีการปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง และมีการเติมค่าความแรงไอออนอยู่แล้ว ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเชื้อ *E. coli* ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเชื้อ *E. coli*

3.2.2 ขั้นตอนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากซินไม้

1) นำถ่านชาร์จากซินไม้มาบดให้มีลักษณะเป็นเกล็ด และทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน ที่มีขนาด 200 – 4.75 มิลลิเมตร

2) นำไปเข้ากระบวนการกระตุ้น โดยการบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่มีตะแกรงกรองอยู่ด้านล่าง เพื่อป้องกันการร่วงหล่นของเศษถ่านกัมมันต์ขณะทำการกระตุ้น แล้วมีเทอร์โมคัปเปิลต่ออยู่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

3) นำเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งใส่ลงไปในเตาเผา CARBOLITE CWF 120 จากนั้นต่อท่อสแตนเลสรูปตัวแอลเข้าบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง เพื่อเป็นทางระบายออกของสารระเหยและก๊าซ

4) เริ่มการทำงานของเตาเผาด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ คือ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน 99.99 เปอร์เซ็นต์ไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 100 มิลลิลิตรต่ออนาที ร่วมกับไอน้ำ ดังภาพที่ 3.5 และทำการจับเวลาที่ 180 นาที

5) เมื่อครบกำหนดเวลา ทำการปิดเตาเผาถ่านแบบท่อ แล้วทิ้งไว้ในอุณหภูมิลดลง จากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปร่อนเอาเอาออก ล้างด้วยน้ำกลั่นและนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

6) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น

7) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่

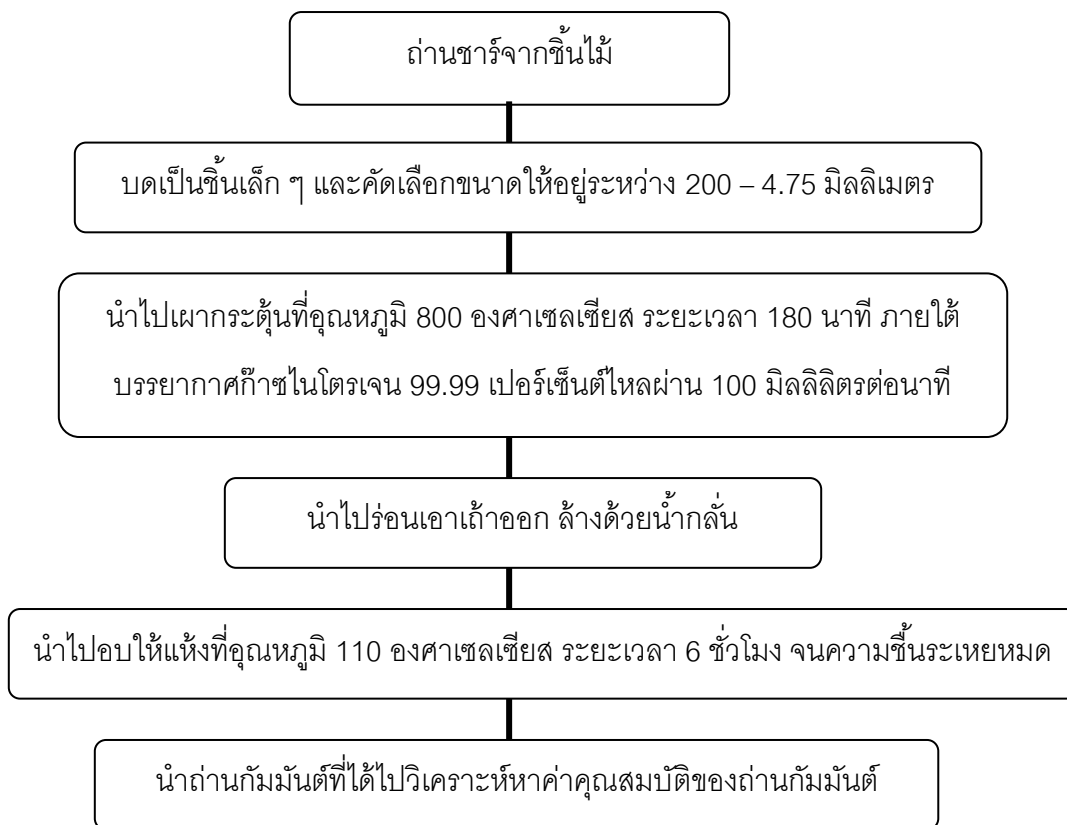
- หาค่าการดูดซับเมทิลีนบลู

- ค่าดูดซับไอโอดีน

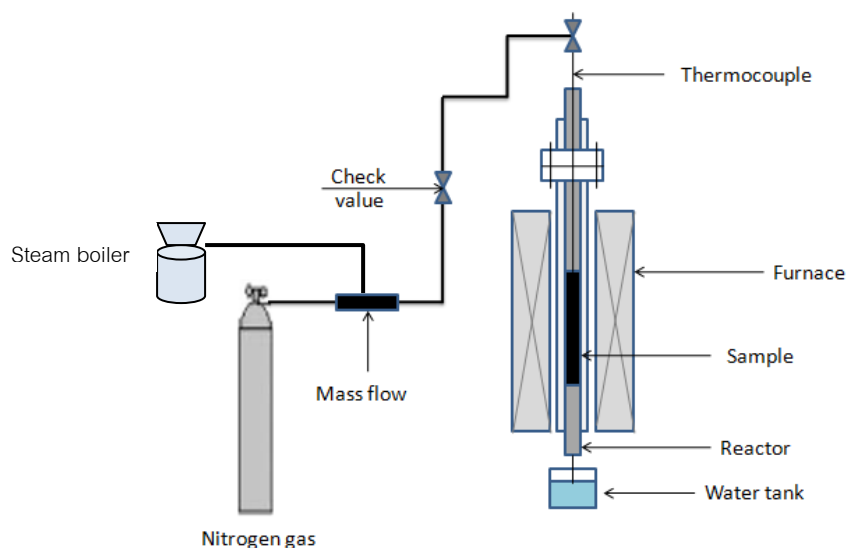
- นำถ่านกัมมันต์ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อดูลักษณะพื้นผิว

8) เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมแล้วนำถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยวิธี BET จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ขั้นตอนในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพแสดงดัง
ภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จากถ่านชาร์เนื้อไม้



ภาพที่ 3.7 แผนภาพเครื่องมือและอุปกรณ์ในการใช้กระตุ้นถ่านกัมมันต์

3.2.3 ขั้นตอนการกรองผ่านถังกรองแบบแห้งโดย

3.2.3.1 ใช้ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าว

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเชื้อ *E. coli* อยู่ โดยน้ำเสียที่ต้องการนำมาศึกษามีค่าความเป็นกรด - ด่าง 3 ค่า คือ 6, 7 และ 8 เติมค่าความแรงไอออน 3 ค่า คือ 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร

2) นำถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่เตรียมจากกะลามะพร้าวซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ดบรรจุลงในถังกรองแบบแห้งที่เป็นท่อแก้วใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร มีรูให้น้ำออกทางด้านล่างของท่อ โดยบรรจุถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวปริมาณ 100 กรัม

3) ป้อนน้ำเสียที่มีเชื้อ *E. coli* อยู่ โดยทำการดูดสารละลายโดยใช้ปั๊มดูดจ่ายสารละลาย (peristaltic pump) ซึ่งทำการปรับความเร็วเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 40, 50 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์

4) น้ำจะไหลผ่านสายยางลงไปยังถังกรองแบบแห้งที่บรรจุถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

5) น้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์แล้วจะถูกบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ที่ทำการอบฆ่าเชื้อโรคแล้ว ซึ่งจะนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

3.2.3.2 ใช้ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า

1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเชื้อ *E. coli* อยู่ โดยน้ำเสียที่ต้องการนำมาศึกษามีค่าความเป็นกรด - ด่าง 3 ค่า คือ 6, 7 และ 8 เติมค่าความแรงไอออน 3 ค่า คือ 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร

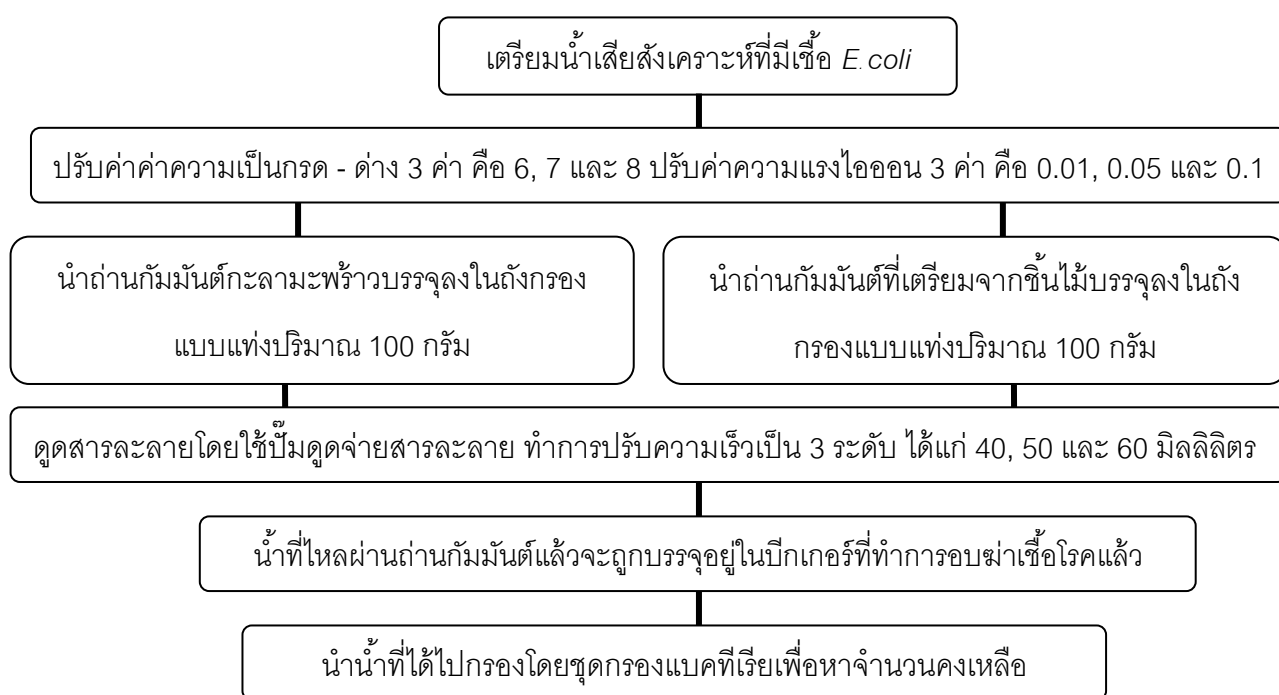
2) นำถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าที่ผ่านกระบวนการกระตุ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ดบรรจุลงในถังกรองแบบแห้งที่เป็นท่อแก้วใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร มีรูให้น้ำออกทางด้านล่างของท่อ โดยบรรจุถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าปริมาณ 100 กรัม

3) ป้อนน้ำเสียที่มีเชื้อ *E. coli* อยู่ โดยทำการดูดสารละลายโดยใช้ปั๊มดูดจ่ายสารละลาย (peristaltic pump) ซึ่งทำการปรับความเร็วเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 40, 50 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์

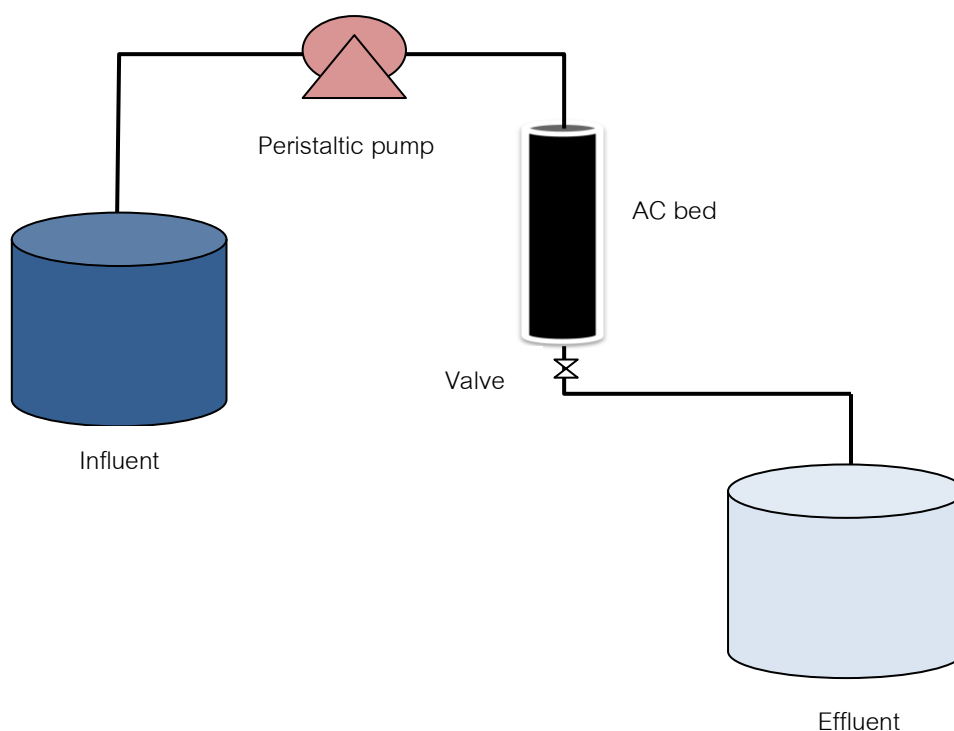
4) น้ำจะไหลผ่านสายยางลงไปยังถังกรองแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้

5) น้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์แล้วจะถูกบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ที่ทำการอบฆ่าเชื้อโรคแล้ว ซึ่งจะนำไปทดลองในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนการกรองน้ำเสียที่มีเชื้อ ผ่านถังกรองแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและถ่านกัมมันต์จากชั้นไม้ แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 กระบวนการกรองน้ำเสียที่มีเชื้อผ่านถังกรองแบบแท่ง



ภาพที่ 3.9 กระบวนการกรองน้ำที่มีเชื้อ *E. coli* ผ่านถ่านกัมมันต์

3.2.4 ขั้นตอนการเก็บผล

1) นำน้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วไปกรองด้วยวิธีเมมเบรน ฟิลเตอร์ เทคนิค ผ่านกระดาษกรองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร ใช้ปริมาณน้ำ 10 มิลลิลิตรต่อกระดาษกรองหนึ่งแผ่น ซึ่งกระดาษกรองชนิดนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถลอดผ่านได้

2) นำไปกระดาษกรองที่ผ่านการกรองแล้ว วางลงบนอาหารแข็ง นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อดูการเจริญเติบโตของเชื้อ

3) หลังจากบ่มไว้ 24 ชั่วโมง นำกระดาษกรองมานับจำนวนโคโลนีที่ขึ้นบนกระดาษกรอง จากนั้นเปรียบเทียบปริมาณโคโลนีที่ขึ้นจากน้ำก่อนผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์กับน้ำหลังผ่านการกรองด้วยถ่านกัมมันต์ เปรียบเทียบเป็นร้อยละการดูดซับ

4) เก็บข้อมูลปริมาณเชื้อทั้งหมดไปวิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ 2^k แฟคทอเรียล

3.3 ศึกษาความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์

ศึกษาความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ แล้วนำผลที่ได้มาเขียนไอโซเทอมการดูดซับ

1) เตรียมถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพในภาชนะที่เหมาะสม นำมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ต่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง ในการทดลองใช้น้ำตัวอย่าง 500 มิลลิลิตรจะใช้ถ่านกัมมันต์เป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัมตามลำดับ

2) ชั่งน้ำหนักถ่านกัมมันต์ กระจายกรองเบอร์ 42 ถาดรองด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง จากนั้นทำการจดน้ำหนักที่แน่นอน

3) เตรียมเชื้อ *E. coli* ตัวอย่างที่ทราบปริมาณเชื้อที่แน่นอนใส่ลงในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

4) นำน้ำจากเชื้อตัวอย่างมา 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดลูกผสมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่บรรจุถ่านกัมมันต์ปราศจากเชื้อ น้ำหนัก 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ต่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง

5) นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า (shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้ถ่านจมตัวจากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกน้ำที่มีเชื้อออกจากถ่านกัมมันต์โดยให้ถ่านกัมมันต์และผงถ่านค้างอยู่บนกระดาษกรอง

6) นำถ่านกัมมันต์และกระดาษกรองวางบนถาดรองและนำไปอบแห้งที่ตู้อบ 70 องศาเซลเซียสข้ามคืน

7) นำถาดรองที่มีกระดาษกรองและถ่านกัมมันต์ออกจากตู้อบแล้วทิ้งไว้ในโถดูดความชื้น 20 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเซลล์แห้งของเชื้อ *E. coli*

8) นำถาดรองที่มีกระดาษกรองและถ่านกัมมันต์ไปอบด้วยตู้อบ 70 องศาเซลเซียส ข้ามคืนแล้วนำไปชั่งน้ำหนักอีกรอบ ทำจนกว่าน้ำหนักจะคงที่

9) นำกราฟที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดซับ

3.4 ขั้นตอนการทำเส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างปริมาณเชื้อและปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์

1) เตรียมเชื้อ *E. coli* ตัวอย่างที่ทราบปริมาณเชื้อที่แน่นอนใส่ลงในน้ำกลั่นปราศจากเชื้อ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2) นำถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเกล็ด บรรจุลงในถังกรองแบบแท่งที่เป็นท่อแก้วใส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร มีรูให้น้ำออกทางด้านล่างของท่อ โดยบรรจุถ่านกัมมันต์ปริมาณ 100 กรัม

3) ป้อนน้ำเสียที่มีเชื้อ *E. coli* อยู่ โดยทำการดูดสารละลายโดยใช้ปั๊มดูดจ่ายสารละลาย

4) น้ำจะไหลผ่านสายยางลงไปยังถังกรองแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์อยู่

5) น้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์แล้วจะถูกบรรจุอยู่ในบีกเกอร์ที่ทำการอบฆ่าเชื้อโรคแล้ว

6) ทำการทดลองซ้ำโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชุดเดิมจนกว่าถ่านกัมมันต์จะไม่มี การดูดซับเชื้ออีก

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากซันไม้ด้วยวิธีการทางกายภาพ โดยใช้ความร้อนร่วมกับก๊าซไนโตรเจนและไอน้ำ อุณหภูมิที่ใช้กระตุ้น 800 องศาเซลเซียส และเป็นระยะเวลา 180 นาที ให้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ด้วยเครื่อง Specific Surface Area Analyzer โดยใช้วิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) พบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากซันไม้ เป็นผลมาจากถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเล็กกว่า แต่ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากซันไม้ ทำให้มีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากซันไม้ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพ	ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	ถ่านกัมมันต์จากซันไม้
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	357.43*	317.95*
ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย (ลบ.ซม./กรัม)	0.246*	0.118*
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (นาโนเมตร)	1.46*	1.49*

หมายเหตุ* ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจากภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

จากการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ตามมาตรฐานของ ASTM D4607-94 เป็นวิธีการชี้วัดความสามารถในการดูดซับสารมวลโมเลกุลต่ำของถ่านกัมมันต์ ซึ่งแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีค่าการดูดซับไอโอดีนสูงจะมีพื้นที่ผิวสูง แต่ถ้าถ่านกัมมันต์ค่าการดูดซับไอโอดีนต่ำจะมีพื้นที่ผิวน้อย พบว่า ค่าการดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากซันไม้เท่ากับ 581.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่าที่ได้ต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าคือ 617.17 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากถ่านกัมมันต์จากซันไม้มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอโอดีนลดลง (ณัฐวิภา จงรัก, 2554) และยังสอดคล้องกับผลการวัดพื้นที่ผิว โดยวิธี BET คือ ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีค่าพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์จากซันไม้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การดูดซับไอโอดีนของถ่านกัมมันต์

ชนิดถ่านกัมมันต์	ค่าการดูดซับไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ถ่านกัมมันต์ทางการค้า	617.17
ถ่านกัมมันต์จากซินไม้	581.15

จากการวิเคราะห์การดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ตามวิธีมาตรฐานของ JIS 1470-1975 เป็นการบอกค่าการดูดซับสารที่ถูกดูดซับที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกับโมเลกุลเมทิลีนบลู ซึ่งขนาดของโมเลกุลเมทิลีนบลูถูกจัดให้อยู่ในขนาดกลาง พบว่า ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากซินไม้ มีค่าน้อย คือ 34.615 และ 27.891 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด มีรูพรุนขนาดกลางน้อย ถ่านกัมมันต์การค้าดูดซับเมทิลีนบลูได้สูงกว่า แสดงว่ามีรูพรุนขนาดกลางมากกว่าถ่านกัมมันต์จากซินไม้ ผลดังแสดงตารางที่ 4.3

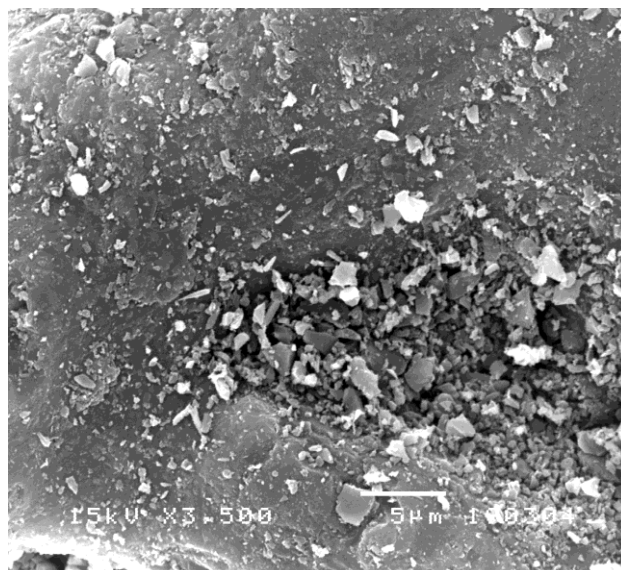
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

ชนิดถ่านกัมมันต์	ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ถ่านกัมมันต์การค้า	34.615
ถ่านกัมมันต์จากซินไม้	27.891

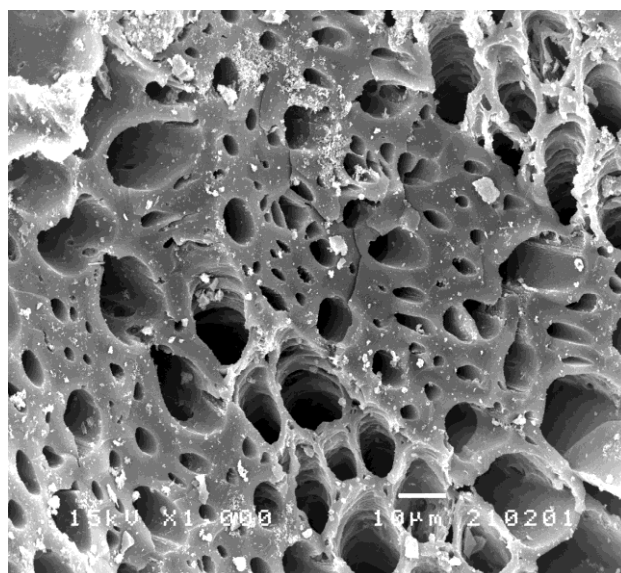
4.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์

จากการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเปรียบเทียบลักษณะระหว่างถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากซินไม้ก่อนกระบวนการกระตุ้น หลังกระบวนการกระตุ้น และผ่านการดูดซับ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

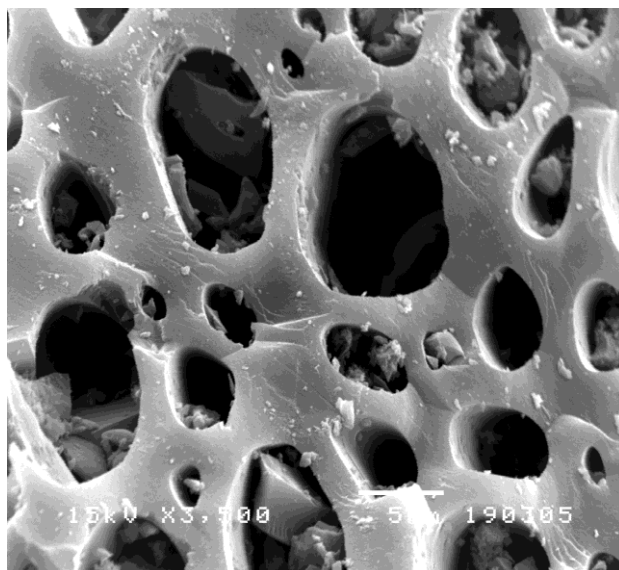
ผลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวและปริมาตรความพรุนของถ่านชาร์จากซินไม้ก่อนผ่านกระบวนการกระตุ้น พบว่าพื้นที่ผิวมีความพรุนน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และเมื่อนำถ่านชาร์ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพ ด้วยภาวะที่เหมาะสม พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์มีความพรุนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และภาพที่ 4.3 โดยลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมีรูพรุนทั้งขนาดใหญ่ ขนาดกลาง ขนาดเล็ก จากภาพที่ 4.2 จะเห็นว่ารูพรุนขนาดใหญ่ของถ่านที่ผ่านการกระตุ้นมีรัศมีมากกว่า 10 ไมโครเมตร และรัศมีจะลดลงตามขนาดของรูพรุนที่เล็กลง



ภาพที่ 4.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์จากชิ้นไม้ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



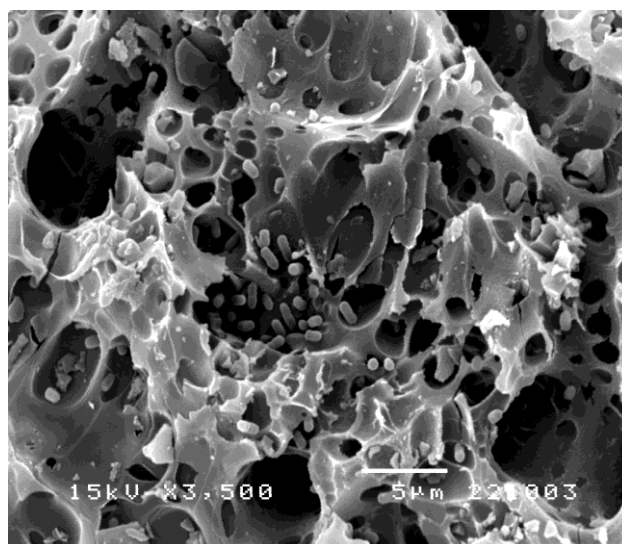
ภาพที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ที่กระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทางการค้า ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้ามีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมากกว่าของถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนเฉลี่ย และปริมาตรเฉลี่ยของรูพรุน ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากเนื้อไม้ โดยวิธี BET

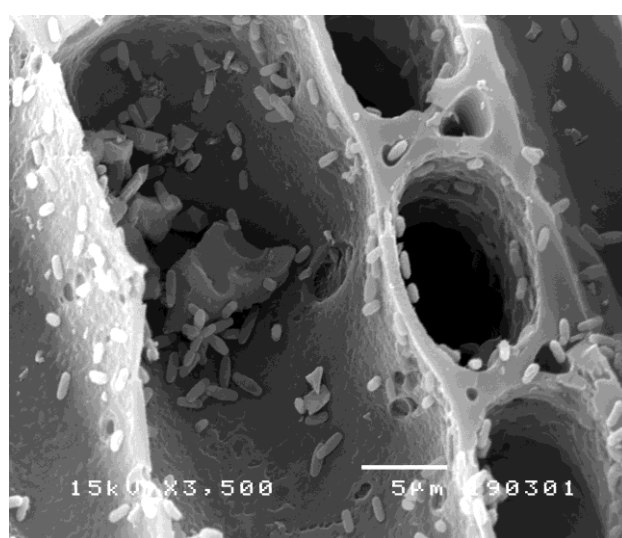


ภาพที่ 4.4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าว ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดซับเชื้อ *E. coli* พบว่ามีเชื้อ *E. coli* เกาะติดอยู่ในบริเวณพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทางการค้าซึ่งรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็กและรูพรุนขนาดกลาง ดังแสดงในภาพที่ 4.5 และจากภาพที่ 4.6 แสดงการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์จากจีนไม่พบว่ามีเชื้อ *E. coli* เกาะติดอยู่ในบริเวณพื้นผิว และรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่และขนาดกลางของถ่านกัมมันต์ แสดงให้เห็นว่าขนาดของรูพรุนมีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli*



ภาพที่ 4.5 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวที่ดูดซับเชื้อ *E. coli* ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า



ภาพที่ 4.6 ลักษณะสัณฐานวิทยาของถ่านกัมมันต์จากจีนไม่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพที่ดูดซับเชื้อ *E. coli* ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

4.3 การหาปัจจัยสำหรับการทดลอง

ในการทดลองเชิงแพคทอเรียล จำเป็นต้องมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ ในการทดลองนี้ศึกษาปัจจัยที่ใช้ทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้

- ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ที่ (A) โดยศึกษาที่ 45, 50 และ 55 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากเมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ต่ำกว่า 45 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ 45 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการไหลของน้ำต่ำ ทำให้ใช้เวลานานในการกรองและเมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์สูงกว่า 55 มิลลิลิตรต่อนาทีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลงไม่ต่างจากค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ 55 มิลลิลิตรต่อนาที

- ค่าความเป็นกรด – ด่าง (B) โดยศึกษา ที่ 6, 7 และ 8 เนื่องจากเป็นภาวะที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตและอยู่อาศัยได้ (Blackburn และ McClure, 2003) ถ้าการทดลองเลือกค่าความเป็นกรด – ด่าง ต่ำกว่า 5 หรือสูงกว่า 9 จะเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่สามารถอยู่อาศัยได้ในสภาวะจริงและยังเป็นอันตรายต่อการนำน้ำไปใช้อุปโภคบริโภค

- ค่าความแรงไอออน (C) เนื่องจากค่าความแรงไอออนยิ่งสูงจะทำให้เกิดการเกาะติดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น (Kim Hyon-Chong, 2009) ในการทดลองนี้เลือกค่าความแรงไอออนที่ 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลการทดลอง

ซึ่งแต่ละปัจจัยที่ศึกษาจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือ ปัจจัยระดับต่ำ (low level) และปัจจัยระดับสูง (high level) โดยออกแบบการทดลองเป็น 2^3 แพคทอเรียล และทำการทดลอง 2 ซ้ำ

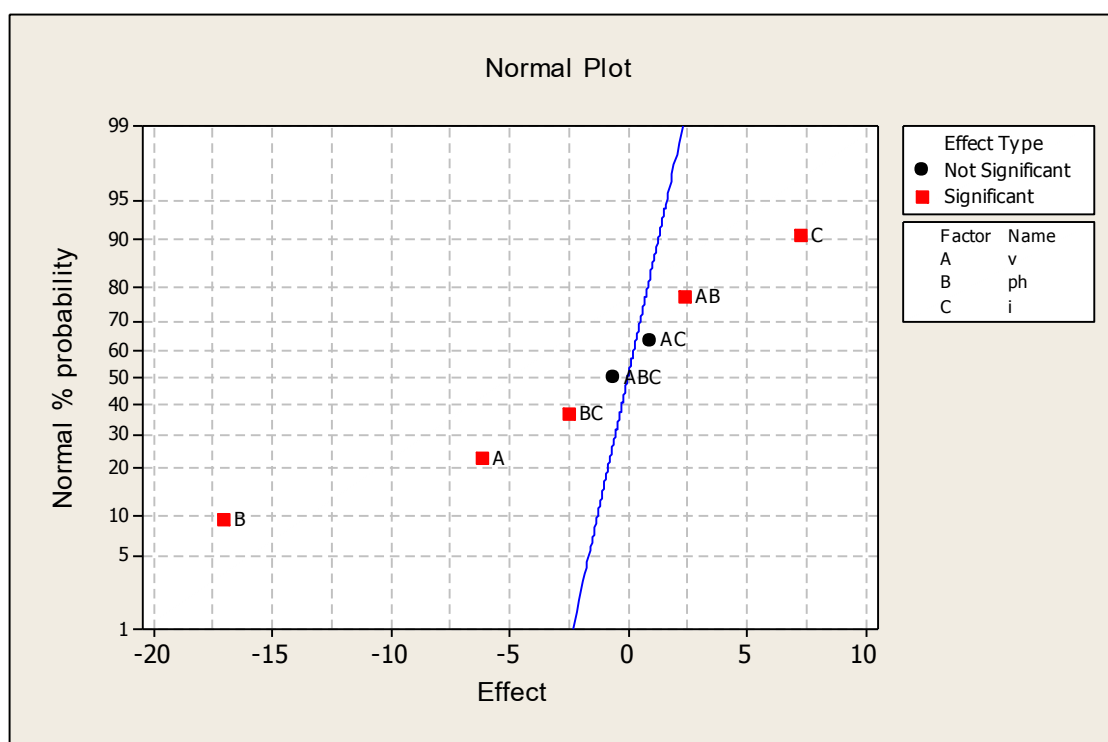
4.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ผลการศึกษานหาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.4 แสดงค่าร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ พบว่า ค่าร้อยละของการดูดซับ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 30.71 ถึง 57.44 โดยชุดการทดลองที่ปัจจัยค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 45 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 6 และค่าความแรงไอออนของสารละลายเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ให้ร้อยละการดูดซับสูงสุด คือ 57.44

ตารางที่ 4.4 ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ที่ปัจจัยต่างๆของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ครั้งที่	ตัวแปร			% Adsorption of <i>E. coli</i>
	อัตราการไหล ของน้ำที่ผ่าน ถ่านกัมมันต์ (ml/min) [A]	ความเป็นกรด – ด่างของ สารละลาย [B]	ค่าความแรง ไอออน (mol/dm ³) [C]	
1	45	6	0.01	48.44
2				50.55
3	55	6	0.01	40.88
4				41.92
5	45	8	0.01	34.62
6				36.26
7	55	8	0.01	33.68
8				30.71
9	45	6	0.10	54.63
10				57.44
11	55	6	0.10	51.45
12				49.46
13	45	8	0.10	38.48
14				39.56
15	55	8	0.10	37.90
16				34.62

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลของร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า ดังแสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาค่า P พบว่าค่าที่ไม่เกิน 0.05 เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้แก่ปัจจัยหลัก คือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ (A) ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลาย (B) ค่าความแรงไอออน (C) และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์กับค่าความเป็นกรด - ด่าง (AB) อันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายกับค่าความแรงไอออน (BC) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความน่าจะเป็น (normal plot) จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ดังแสดงในภาพที่ 4.7



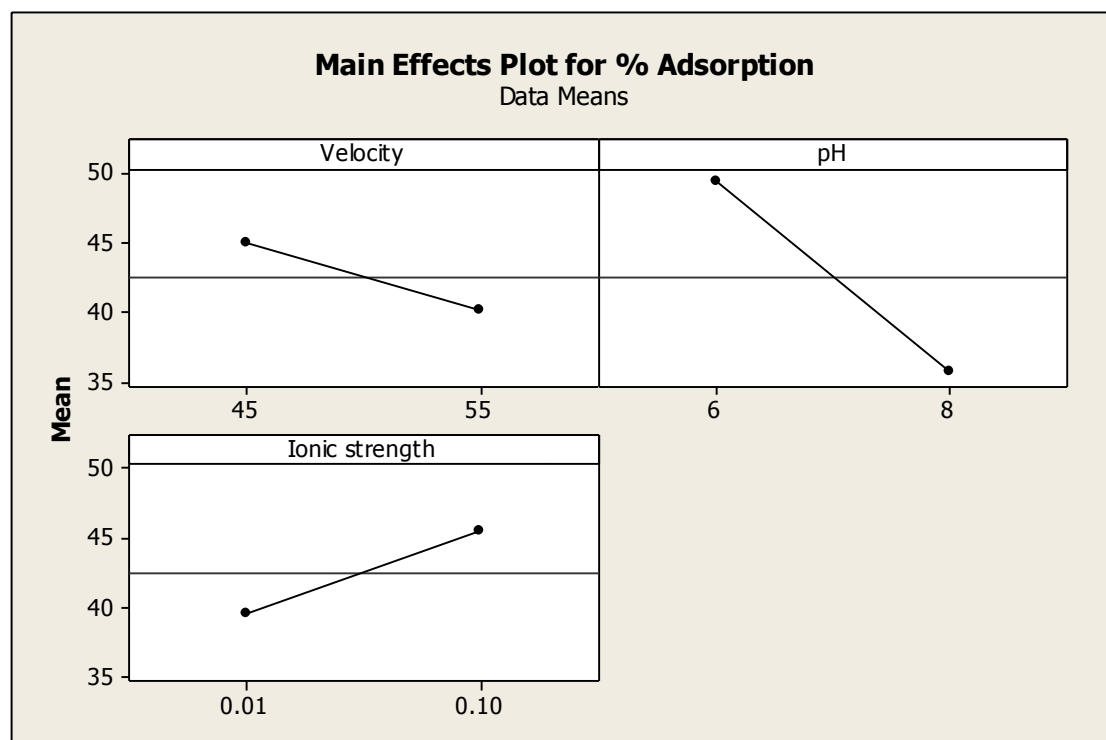
ภาพที่ 4.7 Normal probability plot ของร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ตารางที่ 4.5 ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P-value
Velocity	-4.920	-2.460	0.3993	-6.16	0.000*
pH	-13.617	-6.809	0.3993	-17.05	0.000*
Ionic strength	5.810	2.905	0.3993	7.27	0.000*
Velocity*pH	1.917	0.959	0.3993	2.40	0.043*
Velocity*Ionic strength	0.750	0.375	0.3993	0.94	0.375
pH*Ionic strength	-1.988	-0.994	0.3993	-2.49	0.038*
Velocity*pH*Ionic strength	-0.508	-0.254	0.3993	-0.64	0.543

หมายเหตุ * แทนปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)

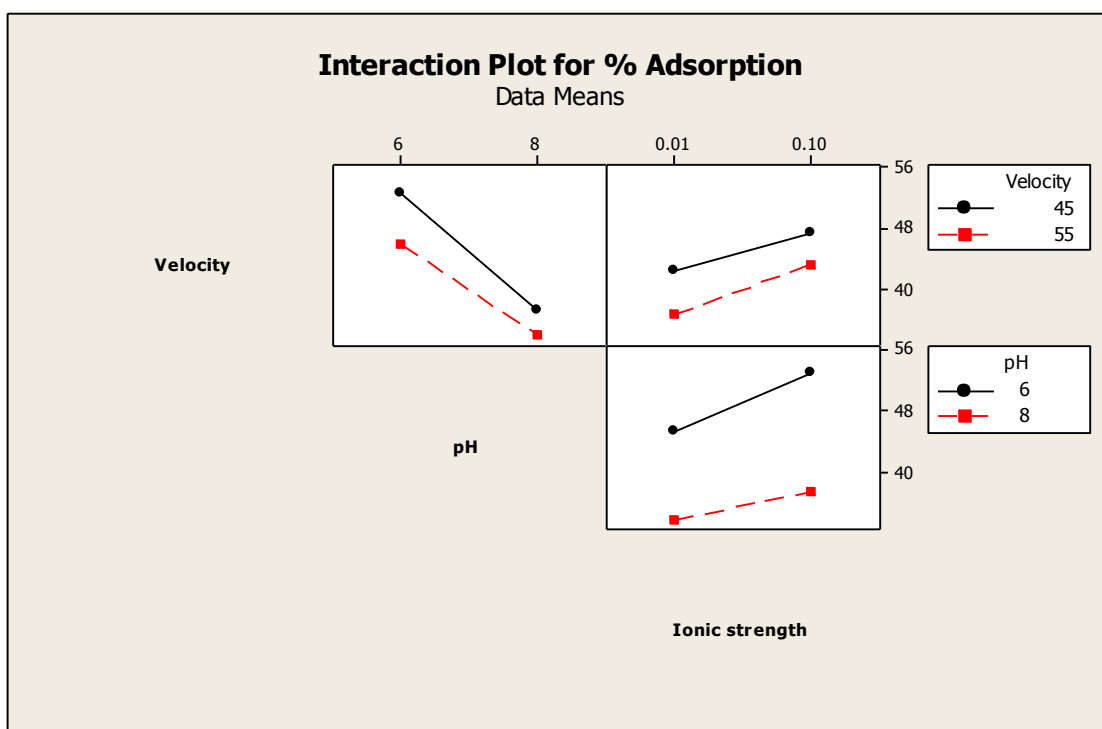
อิทธิพลของปัจจัยหลักดังแสดงในภาพที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ว่า การลดอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลาย และการเพิ่มค่าความแรงไอออนของสารละลาย ทำให้มีร้อยละการดูดซับเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.8 อิทธิพลของปัจจัยหลักของร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า

อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยดังแสดงในภาพที่ 4.9 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย ทั้งสองปัจจัยมีผลทำให้ค่าการดูดซับของเชื้อ *E. coli* เพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 6 ซึ่งมีความเป็นกรดเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มประจุบวกที่ผิวถ่านกัมมันต์ ทำให้สามารถดูดซับกับเชื้อ *E. coli* ได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำต่ำลง จาก 55 มิลลิลิตรต่ออนาที เป็น 45 มิลลิลิตรต่ออนาที จะทำให้ถ่านกัมมันต์มีโอกาสสัมผัสกับเชื้อได้มากยิ่งขึ้น การดูดซับจึงเพิ่มมากขึ้น

อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่าความแรงไอออนของสารละลาย มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ ค่าความแรงไอออนของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 0.01 โมลต่อลิตร เป็น 0.1 โมลต่อลิตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* เพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำต่ำลงจะทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้น และอันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายและค่าความแรงไอออนของสารละลาย ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีความสามารถในการเพิ่มประจุให้กับถ่านกัมมันต์ทำให้มีความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อิทธิพลของพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และขนาดของเชื้อ *E. coli* ยังมีผลต่อการดูดซับอีกด้วย (สาวิตรี จันทรานุกรักษ์และคณะ, 2549)



ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยหลักของร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า

4.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

ผลการศึกษานำปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ พบว่าค่าร้อยละของการดูดซับ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์อยู่ในช่วง 48.84 ถึง 96.95 ซึ่งเป็นการดูดซับที่สูงที่สุด โดยชุดการทดลองจากปัจจัยค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 45 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 6 และค่าความแรงไอออนของสารละลายเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ให้ค่าร้อยละการดูดซับสูงสุดคือ 96.95

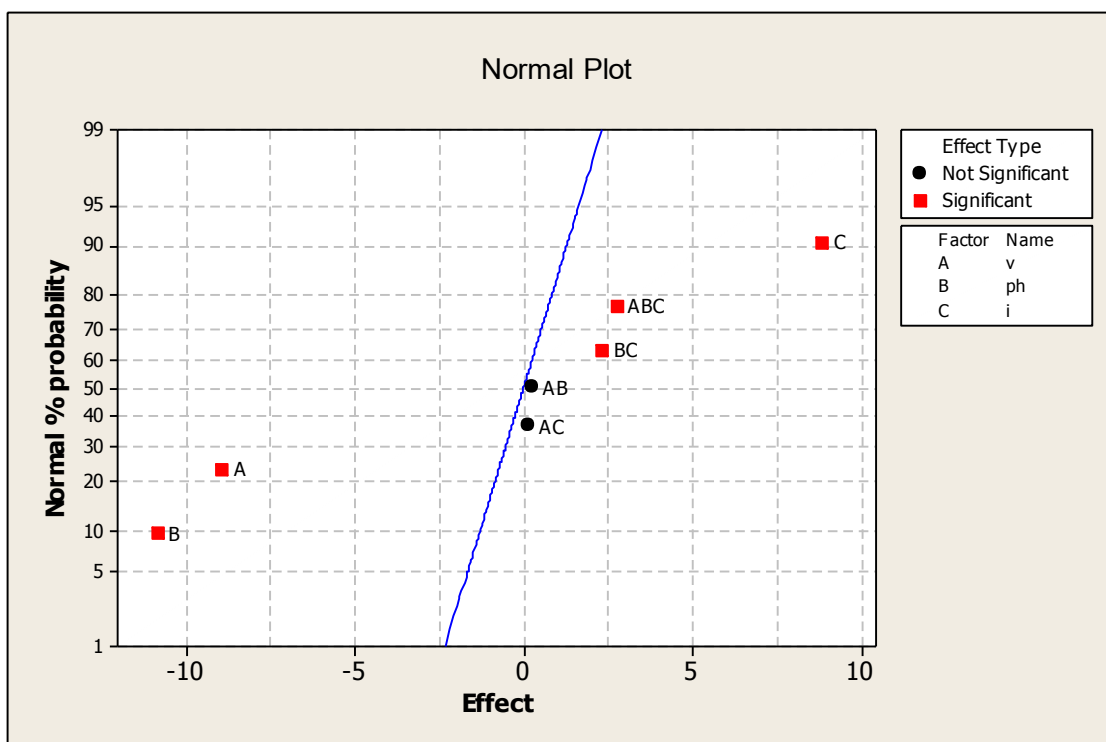
ตารางที่ 4.6 ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ที่ปัจจัยต่างๆของถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

ครั้งที่	ตัวแปร			% Adsorption of <i>E. coli</i>
	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ (ml/min) [A]	ความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย [B]	ค่าความแรงไอออน (mol/dm ³) [C]	
1	45	6	0.01	79.99
2				85.73
3	55	6	0.01	72.08
4				74.99
5	45	8	0.01	68.28
6				67.07
7	55	8	0.01	53.51
8				48.84
9	45	6	0.10	96.95
10				94.42

ตารางที่ 4.6 (ต่อ) ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ที่ปัจจัยต่างๆของถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ

ครั้งที่	ตัวแปร			% Adsorption of <i>E. coli</i>
	อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ (ml/min)	ความเป็นกรด – ต่างของสารละลาย [B]	ค่าความแรงไอออน (mol/dm ³) [C]	
	[A]			
11	55	6	0.10	76.38
12				81.84
13	45	8	0.10	81.95
14				77.03
15	55	8	0.10	72.59
16				69.88

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลของร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จากเนื้อไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่า P พบว่า ค่าที่ไม่เกิน 0.05 เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้แก่ปัจจัยหลัก คือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ (A) ค่าความเป็นกรด – ต่างของสารละลาย (B) ค่าความแรงไอออน (C) และอันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นกรด – ต่างของสารละลายกับค่าความแรงไอออน (BC) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์กับค่าความเป็นกรด – ต่างกับค่าความแรงไอออน (ABC) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จากเนื้อไม้ด้วยวิธีทางกายภาพ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับกราฟความน่าจะเป็น (normal plot) จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล ดังแสดงในภาพที่ 4.10



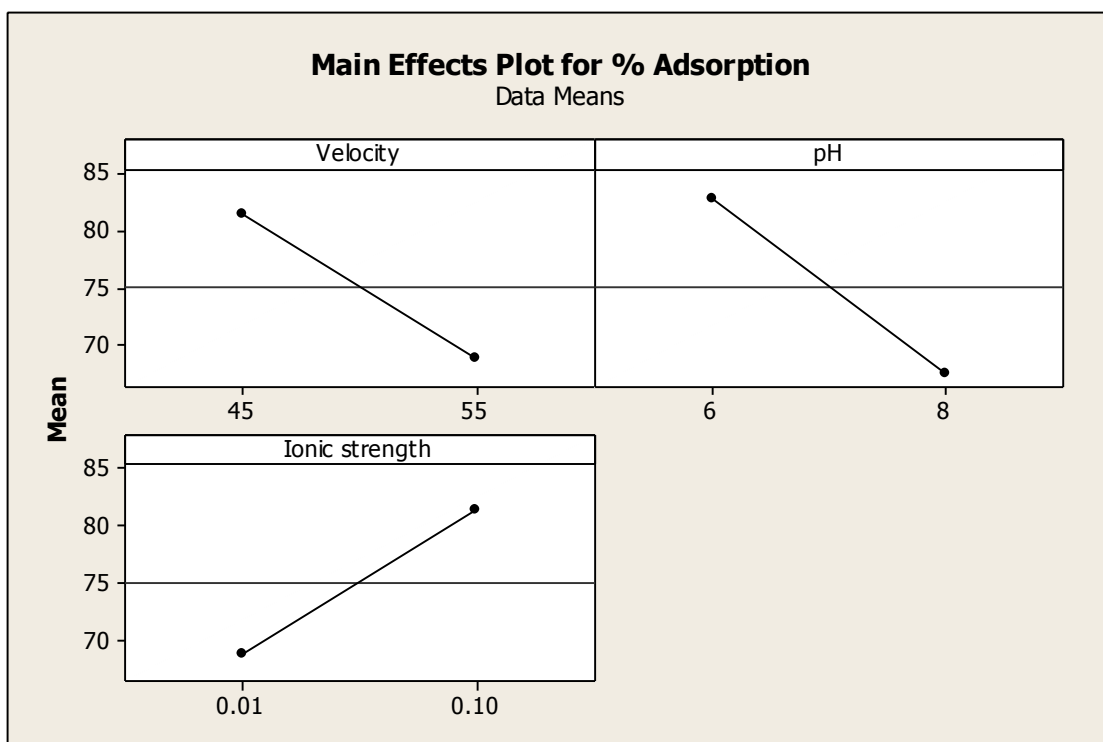
ภาพที่ 4.10 Normal probability plot ของร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ด้วยถ่านกัมมันต์จากชินไม้

ตารางที่ 4.7 ค่าวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จากชินไม้

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P-value
Velocity	-12.664	-6.332	0.7193	-8.80	0.000*
pH	-15.404	-7.702	0.7193	-10.71	0.000*
Ionic strength	12.569	6.284	0.7393	8.74	0.000*
Velocity*pH	0.286	0.143	0.7193	0.20	0.847
Velocity*Ionic strength	0.249	0.124	0.7193	0.17	0.867
pH*Ionic strength	3.369	1.684	0.7193	2.34	0.047*
Velocity*pH*Ionic strength	3.874	1.937	0.7193	2.69	0.027*

หมายเหตุ * แทนปัจจัยที่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P < 0.05$)

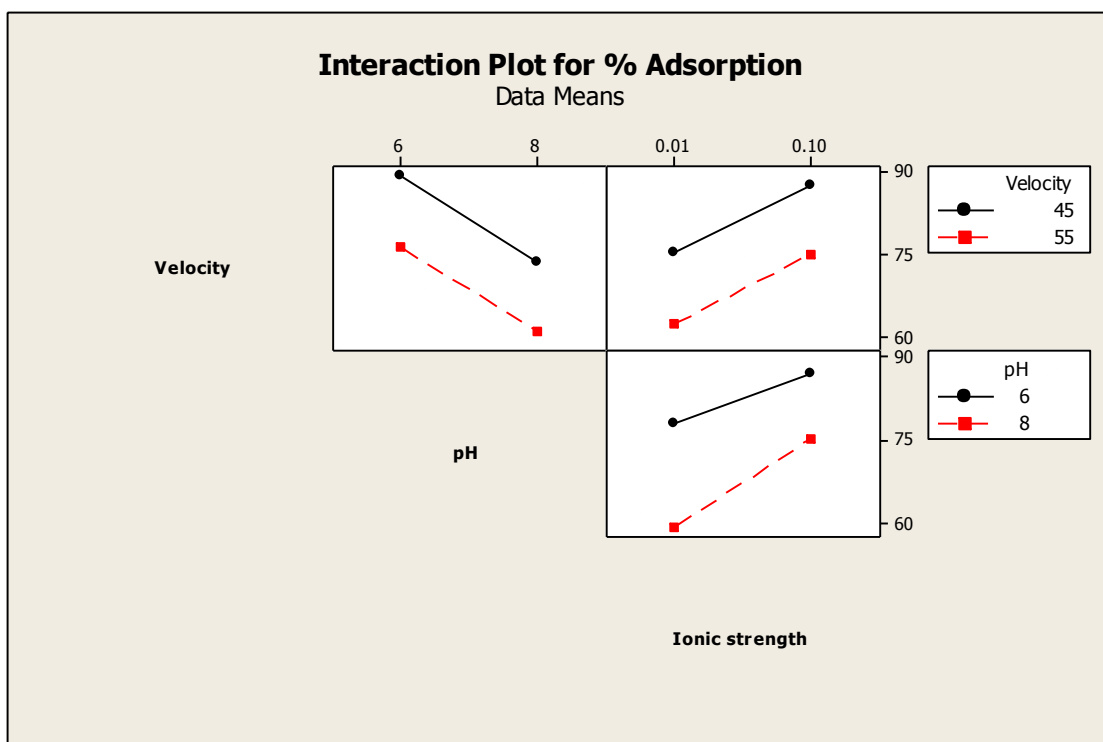
อิทธิพลของปัจจัยหลักดังแสดงในภาพที่ 4.11 สามารถอธิบายได้ว่า การลดอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย และการเพิ่มค่าความแรงไอออนของสารละลาย ทำให้มีร้อยละการดูดซับเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า



ภาพที่ 4.11 อิทธิพลของปัจจัยหลักของร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ด้วยถ่านกัมมันต์จากซินไม้

อิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัยดังแสดงในภาพที่ 4.12 สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับ ถ่านกัมมันต์ทางการค้า คือ อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลาย เมื่ออัตราการไหลของน้ำต่ำลงและค่าความเป็นกรด - ด่างลดลง เป็นผลให้การดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์เกิดได้ดียิ่งขึ้น

อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำและค่าความแรงไอออนของสารละลาย สามารถอธิบายได้ในแนวทางเดียวกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า คือ การเพิ่มค่าความแรงไอออนของสารละลาย และลดอัตราการไหลของน้ำให้ต่ำลงจะทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และอันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นกรด - ด่างของสารละลายและค่าความแรงไอออนของสารละลาย ซึ่งปัจจัยทั้งสองมีผลให้เพิ่มร้อยละการดูดซับ เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มประจุให้กับผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ และขนาดของเชื้อ *E. coli* ซึ่งมีผลต่อการดูดซับ



ภาพที่ 4.12 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยหลักของร้อยละของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ด้วยถ่านกัมมันต์จากซินไม้

4.4 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า และถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ

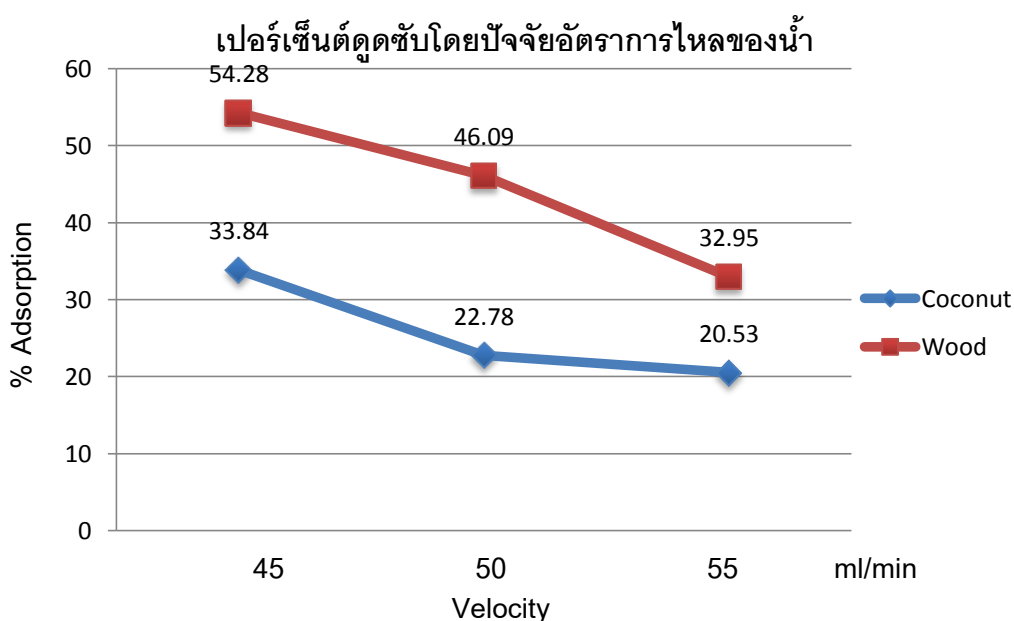
ในการทดลองนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเชื้อ *E. coli* ประกอบด้วย 3 ภาวะ คือ อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย และค่าความแรงไอออนของสารละลาย

4.4.1 อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์

จากการทดลองคัดเลือกปัจจัยด้านอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าพบว่า อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 45 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลของน้ำที่ช้าที่สุด ให้ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า เท่ากับ 33.84 ซึ่งเป็นค่าการดูดซับที่มากที่สุดในทุกความเร็วของการทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* เท่ากับ 22.78 และที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อให้ค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 20.53 ซึ่ง

เป็นค่าการดูดซับเชื้อ *E. coli* ที่น้อยที่สุด สำหรับปัจจัยทางด้านอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์จากซินไม้ มีค่าการดูดซับเชื้อ *E. coli* เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับถ่านกัมมันต์ทางการค้า แต่ให้ค่าการดูดซับสูงมากกว่า คือ ที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 45 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับมีค่าสูงสุดเท่ากับ 54.28 และที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* เท่ากับ 46.09 และที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 55 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์สูงที่สุด และให้ค่าร้อยละการดูดซับต่ำที่สุดคือ 32.95 ดังแสดงในภาพที่ 4.13



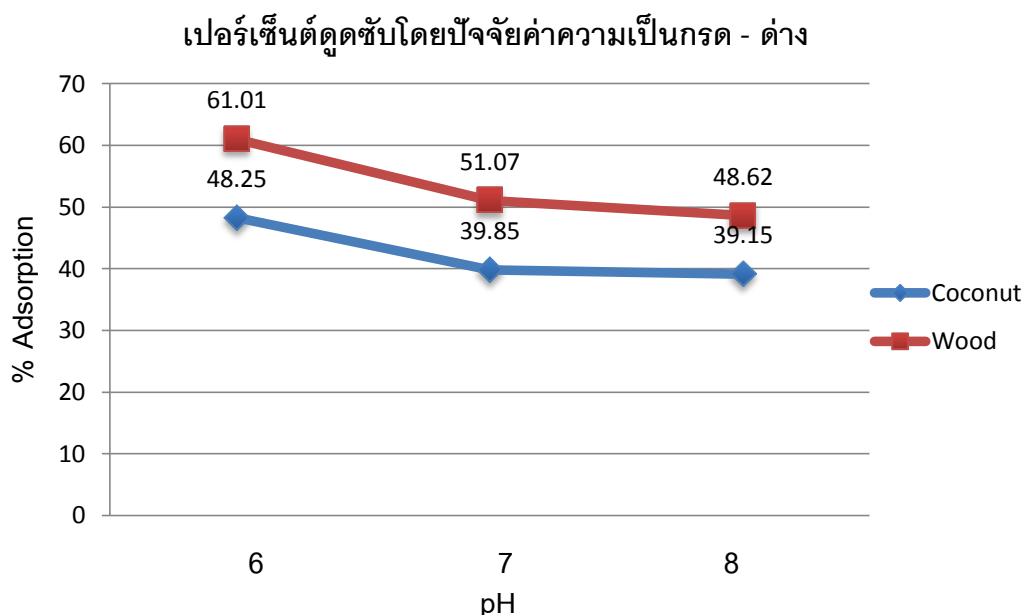
ภาพที่ 4.13 เปอร์เซนต์การดูดซับ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์การค้าและถ่านกัมมันต์จากซินไม้ โดยปัจจัยอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์

สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ต่ำ (45 มิลลิลิตรต่อนาที) ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจะให้ค่าร้อยละการดูดซับสูงที่สุด คือ 33.84 และถ่านกัมมันต์จากซินไม้ค่าร้อยละการดูดซับจะเท่ากับ 54.28 เนื่องจากที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ต่ำ ทำให้น้ำมีโอกาสสัมผัสกับถ่านกัมมันต์ได้นานยิ่งขึ้น ทำให้เชื้อ *E. coli* มีโอกาสเกาะติดบริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ดียิ่งขึ้น แต่จะทำให้น้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์ใช้เวลานานขึ้นในกระบวนการกรองแต่ละครั้ง เมื่ออัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 50 และ 55 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้

ค่าร้อยละการดูดซับลดลง คือเท่ากับ 22.78, 20.53 และถ่านกัมมันต์จากซินไม มีสามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้ร้อยละ 46.09 , 32.95 ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำให้สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างเชื้อ *E. coli* และถ่านกัมมันต์น้อยลง โดยระยะเวลาสัมผัสที่ลดลง ทำให้การเกาะติดของ *E. coli* บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงเช่นกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราการยึดติดของถ่านกัมมันต์กับเชื้อ *E. coli* แปรผกผันกับอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์

4.4.2 ค่าความเป็นกรด – ด่าง

จากการทดลองคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย ได้ทำการคัดเลือกค่าที่เหมาะสมมา 3 ค่า คือ 6, 7 และ 8 ซึ่งเป็นค่าที่เชื้อจุลินทรีย์ทั่วไปสามารถเจริญเติบโตและอาศัยอยู่ได้ พบว่าค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 6 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างไปทางกรดเล็กน้อย ทำให้ค่าร้อยละการดูดซับระหว่างเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าเท่ากับ 48.25 และถ่านกัมมันต์จากซินไมให้ค่าร้อยละการดูดซับ *E. coli* เท่ากับ 61.01 ซึ่งเป็นค่าการดูดซับเชื้อ *E. coli* สูงสุดในปัจจุบันนี้ และที่ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 7 ค่าร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้า เท่ากับ 39.85 และค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์จากซินไมเท่ากับ 51.07 และที่ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 8 ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าเท่ากับ 39.15 และค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์จากซินไมเท่ากับ 48.62 เป็นค่าการดูดซับที่น้อยที่สุดของปัจจัยด้านค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย ดังแสดงในภาพที่ 4.14

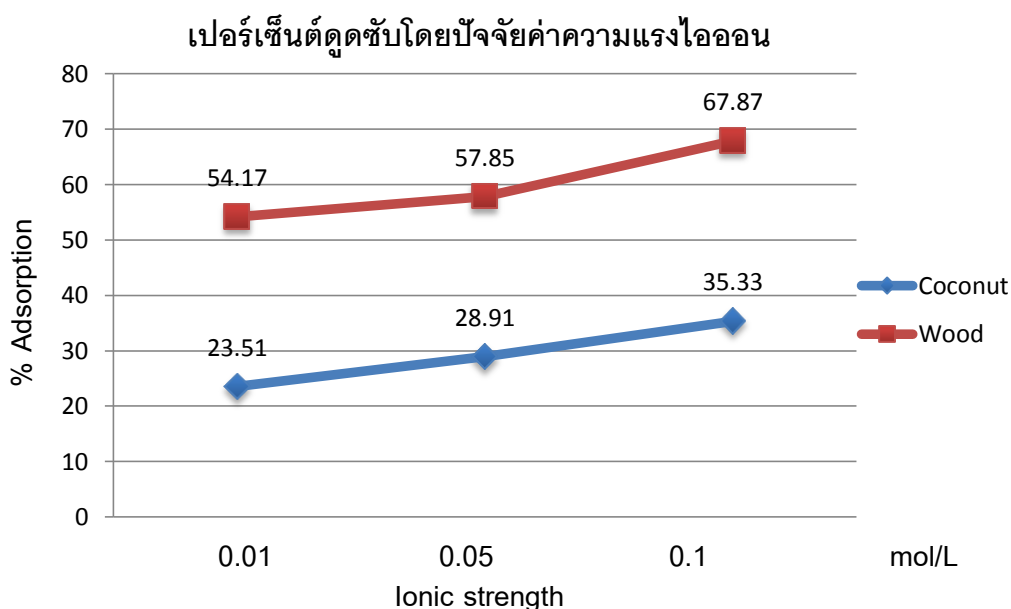


ภาพที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การดูดซับ *Escherichia coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า โดยปัจจัยค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลาย

สำหรับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลาย จากผลการทดลองพบว่า ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลาย เท่ากับ 6 ซึ่งค่อนข้างไปทางกรดเล็กน้อย ทำให้ค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากขี้เถ้ามีค่าสูงสุด เท่ากับ 48.25 และ 61.01 ตามลำดับ เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลายที่เป็นกรด จะทำให้มีประจุบวกเพิ่มในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีประจุบวกที่บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ ซึ่งช่วยทำให้เกิดกระบวนการการดูดซับระหว่างเชื้อ *E. coli* ซึ่งมีประจุเป็นลบและถ่านกัมมันต์สูงขึ้น โดยปกติแล้ว ถ่านกัมมันต์จะมีประจุเป็นบวกเล็กน้อยบริเวณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ที่ค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลายเท่ากับ 7 มีค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* รองลงมา เท่ากับ 39.85 และ 51.07 ตามลำดับ เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลายที่เป็นกลาง จะทำให้มีประจุบวกและประจุลบเท่าๆกัน ส่งผลให้การดูดซับของเชื้อ *E. coli* ซึ่งมีประจุลบ และพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร และที่ค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลายเท่ากับ 8 มีค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากขี้เถ้าเท่ากับ 39.15 และ 48.62 ซึ่งเป็นค่าการดูดซับต่ำที่สุดของปัจจัยจากค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลาย เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด - ต่างเท่ากับ 8 มีประจุลบในสารละลายมากกว่าประจุบวก ทำให้เกิดการรบกวนการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ ส่งผลให้การดูดซับเกิดขึ้นได้น้อยมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด - ต่างของสารละลายเป็นกรดหรือเป็นกลาง

4.4.3 ค่าความแรงไอออน

จากการทดลองคัดเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มค่าความแรงไอออนของสารละลาย ได้เลือกค่าที่สนใจศึกษามา 3 ค่า คือ 0.01, 0.05 และ 0.1 โมลต่อลิตร ซึ่งจากงานวิจัยที่ศึกษาของ Kim Hyon-Chong (2009) พบว่าสารละลายที่มีค่าความแรงไอออนสูงจะทำให้การยึดติดระหว่างถ่านกัมมันต์ซึ่งมีประจุเป็นบวกเล็กน้อยบริเวณรูพรุน กับเชื้อ *E. coli* ที่มีประจุบริเวณผิวเป็นลบเกิดได้มากยิ่งขึ้น จึงคัดเลือกค่าที่สูงที่สุดเป็น 0.1 โมลต่อลิตร และเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างจึงเลือกค่าน้อยที่สุดเป็น 10 เท่าของค่าความแรงไอออนที่สูงที่สุด พบว่า ที่ค่าความแรงไอออนในสารละลายที่สูงที่สุด คือ 0.1 โมลต่อลิตร มีค่าร้อยละการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากจีนไม่ เท่ากับ 35.33 และ 67.87 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าการดูดซับสูงสุดในปัจจัยนี้ ที่ความแรงไอออนของสารละลายเท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตร มีค่าร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากจีนไม่ เท่ากับ 28.91 และ 57.85 ตามลำดับ และที่ค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลต่อลิตร เป็นค่าที่ต่ำที่สุดในปัจจัย มีค่าร้อยละการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากจีนไม่ เท่ากับ 23.51 และ 54.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าการดูดซับน้อยที่สุดในปัจจัยนี้ ดังแสดงในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 เปอร์เซนต์การดูดซับ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากจีนไม่ โดยปัจจัยค่าความแรงไอออน

จากผลการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ พบว่า การปรับค่าความแรงไอออนของสารละลายเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร ทำให้ความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากซันไม้ มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 35.33 และ 67.87 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องจากค่าความแรงไอออนหรือ Ionic strength มีผลในการทำให้เกิดการดูดซับระหว่างเชื้อ *E. coli* กับพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ เพราะการเพิ่มความแรงไอออนในสารละลาย ทำให้มีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น บริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับกับเชื้อ *E. coli* ซึ่งบริเวณผิวมีประจุเป็นลบได้ดีขึ้น จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ที่ค่าความแรงไอออนในสารละลายสูงส่งผลให้การดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์จะสูงขึ้นตามไปด้วย (ให้ผลในทางเดียวกันกับงานวิจัยของ J Rivera – Utrilla) เนื่องจากผลของแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของค่าความแรงไอออนที่ช่วยให้ถ่านกัมมันต์มีประจุเป็นบวกสูงขึ้น ซึ่งมีความสามารถดูดซับประจุลบที่บริเวณผิวของเชื้อ *E. coli* ได้ดียิ่งขึ้น

4.5 การศึกษาปริมาณการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากซันไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ

จากผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าทั้งถ่านกัมมันต์ทางการค้า และจากซันไม้ มีปริมาณความเข้มข้นของเชื้อ *E. coli* ที่ผ่านออกจากคอลัมน์ในระยะแรกช่วงปริมาตรน้ำ 0.50 ถึง 1.50 ลิตร มีน้อย เมื่อมีปริมาตรน้ำไหลผ่านเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของปริมาณเชื้อ *E. coli* ในน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์จะค่อยๆ สูงมากขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มที่ลดลง ทำให้ทราบว่า ถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดเริ่มหมดประสิทธิภาพในการดูดซับเชื้อ *E. coli* และเมื่อปริมาตรน้ำถึงระดับหนึ่งที่ปริมาณเชื้อ *E. coli* หลังผ่านคอลัมน์มีปริมาณเชื้อ *E. coli* เท่ากับปริมาณก่อนผ่านคอลัมน์ เรียกจุดนี้ว่า จุดหมดสภาพ ซึ่งหมายความว่าถึงจุดที่ถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากซันไม้ ไม่มีความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้อีกแล้ว หรือหมดสภาพในการดูดซับติดผิวนั่นเอง สามารถอธิบายได้ว่าในระยะแรกของการดูดซับ พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ยังว่างมืออยู่มาก ทำให้สามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้มาก แต่เมื่อมีปริมาตรน้ำไหลผ่านในคอลัมน์เพิ่มมากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับของถ่านกัมมันต์ลดน้อยลง จนกระทั่งไม่สามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้ในที่สุด เป็นสาเหตุทำให้น้ำที่ผ่านคอลัมน์ในช่วงหลังมีปริมาณเชื้อ *E. coli* สูงขึ้น

ตารางที่ 4.8 ปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ทางการค้า 100 กรัม

ปริมาตร น้ำ (ลิตร)	เชื้อเริ่มต้น (CFU/ml) C_0	ปริมาณเชื้อที่		จำนวน <i>E. coli</i> ที่ดูด ซับ (CFU/ml)
		เหลือ (CFU/ml) C	$C \times 100/C_0$ (%)	
0.50	3.74×10^4	0.20×10^4	5.35	3.54×10^4
1.00	3.74×10^4	0.52×10^4	13.90	3.22×10^4
1.50	3.74×10^4	0.66×10^4	17.64	3.08×10^4
2.00	4.32×10^4	1.52×10^4	35.18	2.08×10^4
2.50	4.32×10^4	1.66×10^4	38.42	2.66×10^4
3.00	8.26×10^4	5.66×10^4	68.52	2.60×10^4
3.50	8.26×10^4	7.26×10^4	87.90	1.00×10^4
4.00	7.46×10^4	6.74×10^4	90.34	0.72×10^4
4.50	7.46×10^4	7.32×10^4	98.12	0.14×10^4
5.00	7.46×10^4	7.46×10^4	100.00	0.00×10^4
5.50	7.46×10^4	7.46×10^4	100.00	0.00×10^4
รวม				1.97×10^5
จำนวน <i>E. coli</i> ที่ดูดซับต่อถ่านกัมมันต์ 1 กรัม (CFU/ml)				1.97×10^3

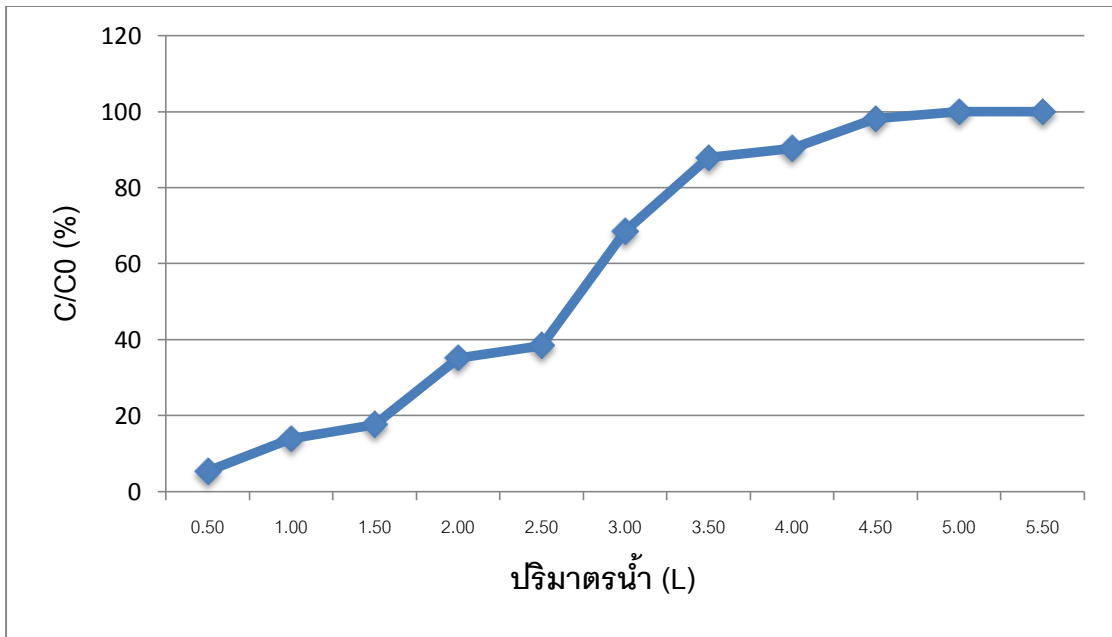
ตารางที่ 4.9 ปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ 100 กรัม

ปริมาตร น้ำ (ลิตร)	เชื้อเริ่มต้น (CFU/ml) C_0	ปริมาณเชื้อที่		จำนวน <i>E. coli</i> ที่ดูด ซับ (CFU/ml)
		เหลือ (CFU/ml) C	$C \times 100/C_0$ (%)	
0.50	7.86×10^4	0.00×10^4	0.00	7.86×10^4
1.00	8.12×10^4	0.26×10^4	3.20	7.86×10^4
1.50	8.26×10^4	0.52×10^4	6.29	7.68×10^4
2.00	8.52×10^4	3.86×10^4	45.30	4.66×10^4

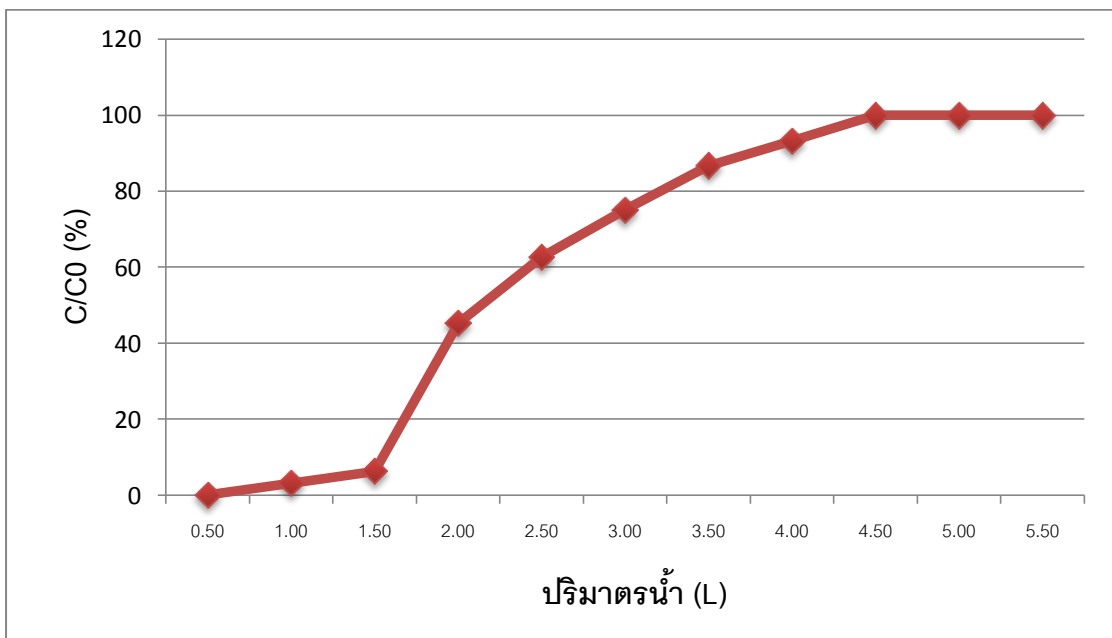
ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จากชิ้นไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ 100 กรัม

ปริมาตร น้ำ (ลิตร)	เชื้อเริ่มต้น (CFU/ml) C_0	ปริมาณเชื้อที่		จำนวน <i>E. coli</i> ที่ดูด ซับ (CFU/ml)
		เหลือ (CFU/ml) C	$C \times 100/C_0$ (%)	
2.50	8.52×10^4	5.34×10^4	62.67	3.18×10^4
3.00	8.52×10^4	6.40×10^4	75.11	2.12×10^4
3.50	4.52×10^4	3.92×10^4	86.72	1.40×10^4
4.00	2.06×10^4	1.92×10^4	93.20	0.14×10^4
4.50	4.06×10^4	4.06×10^4	100.00	0.00×10^4
5.00	5.06×10^4	5.06×10^4	100.00	0.00×10^4
5.50	5.06×10^4	5.06×10^4	100.00	0.00×10^4
รวม				3.49×10^5
จำนวน <i>E. coli</i> ที่ดูดซับต่อถ่านกัมมันต์ 1 กรัม (CFU/ml)				3.49×10^3

จากผลการศึกษา Breakthrough Curve การดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากเนื้อไม้ ดังแสดงในภาพที่ 4.16 และ 4.17 พบว่า ถ่านกัมมันต์ทางการค้า 1 กรัม มีความสามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้ 1.97×10^3 CFU/ml และถ่านกัมมันต์จากเนื้อไม้ 1 กรัม มีความสามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้ 3.49×10^3 CFU/ml



ภาพที่ 4.16 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างปริมาณเชื้อ *E. coli* คงเหลือกับปริมาณน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์ทางการค้า ปริมาณ 100 กรัม



ภาพที่ 4.17 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างปริมาณเชื้อ *E. coli* คงเหลือกับปริมาณน้ำที่ผ่านถ่านกัมมันต์จากจีนไม้ปริมาณ 100 กรัม

4.6 การศึกษาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์

การศึกษาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์เป็นการศึกษาหาอิทธิพลการดูดซับระหว่างปริมาณถ่านกัมมันต์กับเชื้อ *E. coli* ในน้ำตัวอย่าง โดยในน้ำตัวอย่างมีเชื้อ *E. coli* คิดเป็นน้ำหนักเซลล์แห้งเท่ากับ 62 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาณ 2%, 4%, 6%, 8% และ 10% ของน้ำตัวอย่าง ลงในขวดแต่ละใบ ตามลำดับ แล้วเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปกรองให้ถ่านและผงถ่านที่หลุดออกมาอยู่บนกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกตัวอย่างถ่านและน้ำตัวอย่างออกจากกัน และนำถ่านไปอบแห้งที่ตู้อบ 70 องศาเซลเซียสข้ามคืน เพื่อชั่งน้ำหนักเซลล์แห้ง หลังผ่านการดูดซับ นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับเชื้อ *E. coli* ในน้ำตัวอย่างของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากจีนไม่แสดงดังตารางที่ 4.10, 4.11 และภาพที่ 4.18, 4.19 สามารถอธิบายได้จากสมการฟรุนดลิช ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสาวิตรี จันทรานุรักษ์และคณะ (2549) ได้ศึกษาวิจัยถ่านกัมมันต์จากก้านทะเลลายปาล์มน้ำมันและการดูดซับเชื้อ *E. coli*

สมการฟรุนดลิช คือ $X/M = KC^{1/n}$ หรือ $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$ เมื่อทำการวาดกราฟ \log ด้วยค่า X/n และค่า C จะได้เส้นกราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งความสามารถในการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากจีนไม่พิจารณาได้จากค่า X/M ซึ่งเป็นปริมาณของเชื้อ *E. coli* ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ใช้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสามารถดูได้จากค่าคงที่ K และ $1/n$ ที่คำนวณได้จากสมการฟรุนดลิช โดยที่ $\log K$ เป็นจุดตัดแกน y และ $1/n$ เป็นความชันของสมการเส้นตรง ซึ่งค่าดังกล่าวจะเป็นตัวชี้บอกถึงความสามารถในการดูดซับได้ ถ้าค่า $\log K$ และ $1/n$ มีค่ามาก หมายความว่าความสามารถในการดูดซับสูง ในทางกลับกันถ้าค่า $\log K$ และ $1/n$ มีค่าน้อย หมายความว่าความสามารถในการดูดซับต่ำ (ณัฐวิภา จงรัก, 2554)

4.6.1 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์การค้าจากกะลามะพร้าว

การศึกษาไอโซเทอมของถ่านกัมมันต์การค้าจากการดูดซับเชื้อ *E. coli* แสดงผลในตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.18

ตารางที่ 4.10 การทดสอบการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์ทางการค้า

น้ำหนักถ่าน (g)	น้ำหนักเซลล์แห้งที่เหลือ (mg/L)			X_i (mg)	X ($X_i - X_i$) (mg)	X/m (mg/g)	1/C	1/(X/m)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย					
0.00	68	56	62	3.1 (X_i)	-	-	-	-
1.03	50	52	52	2.50	0.50	0.4834	0.3846	2.0685
2.00	48	46	47	2.35	0.75	0.3733	0.4255	2.6787
3.01	44	42	44	2.10	0.90	0.2986	0.4545	3.3482
4.06	36	38	38	1.80	1.20	0.2953	0.5263	3.3862
5.02	32	34	33	1.65	1.45	0.2886	0.6060	3.4538

โดยค่า X คือ ปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งของ *E. coli* ที่ถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัม)

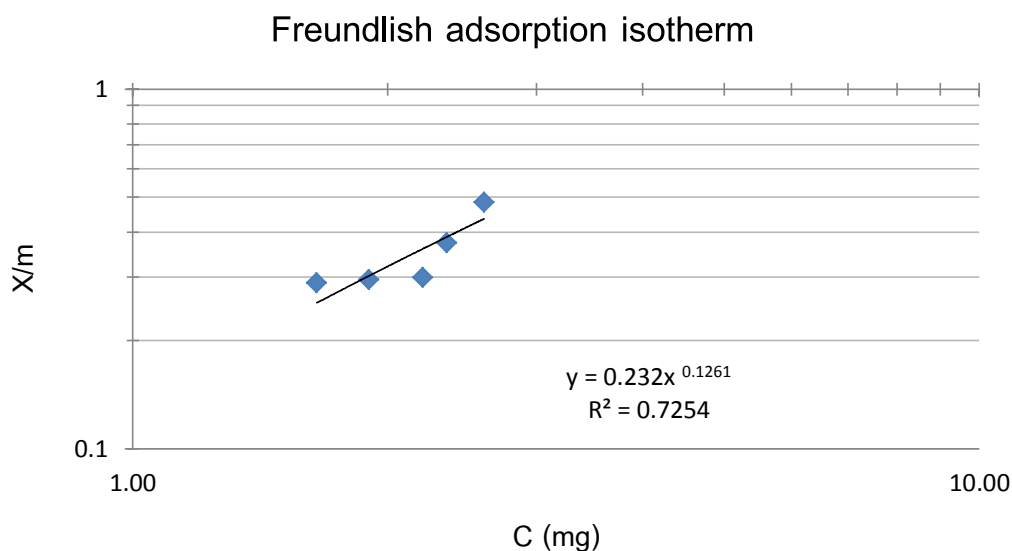
m คือ น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

X_i คือ ปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งของเชื้อ *E. coli* ในสารละลายเริ่มต้น (มิลลิกรัม)

X_f คือ ปริมาณน้ำหนักเซลล์แห้งของเชื้อ *E. coli* ที่คงเหลือในสารละลาย (มิลลิกรัม)

C คือ ความเข้มข้นของเชื้อ *E. coli* ที่คงเหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

กราฟไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ในน้ำตัวอย่างแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ทางการค้า สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 0.232x^{0.1261}$ และค่า $R^2 = 0.7254$ แสดงในภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 ไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ในน้ำตัวอย่าง หลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทางการค้า

4.6.2 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ

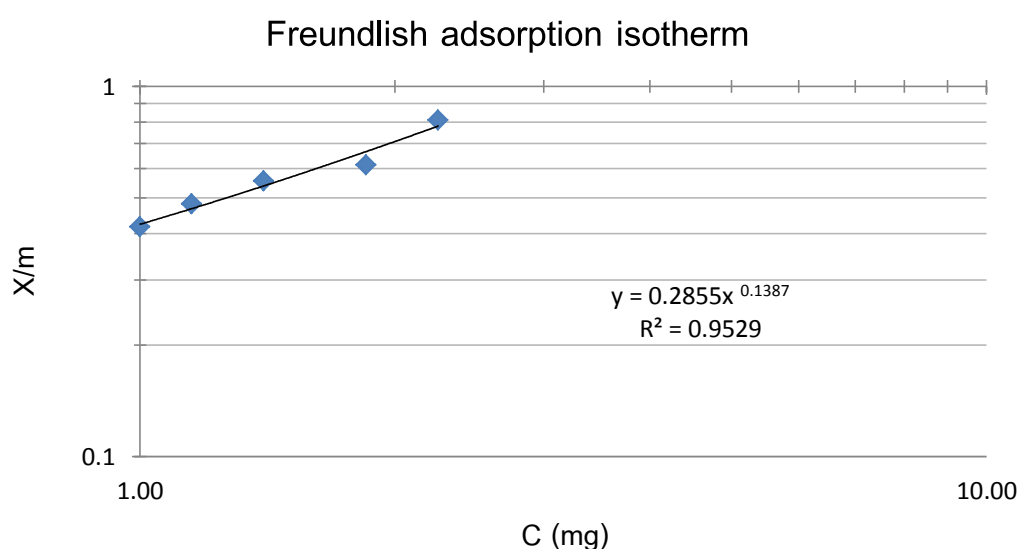
ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* แสดงผลในตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.19

ตารางที่ 4.11 การทดสอบการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์จากซินไม้

น้ำหนัก ถ่าน (g)	น้ำหนักเซลล์แห้งที่เหลือ			X_f (mg)	X ($X_i - X_f$) (mg)	X/m (mg/g)	1/C	1/(X/m)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย					
0.00	68	56	62	3.1 (X_i)	-	-	-	-
1.04	44	42	45	2.15	0.85	0.8104	0.4444	1.2338
2.03	40	36	38	1.90	1.20	0.5885	0.5263	1.6990
3.06	32	30	31	1.55	1.55	0.6451	0.6451	1.9768
4.04	28	24	26	1.30	1.80	0.7692	0.7692	2.2495
5.03	20	22	21	1.05	2.05	0.9523	0.9523	2.4552

กราฟไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ในน้ำตัวอย่างแบบพหุนคติชของถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 0.2855x^{0.1387}$ และค่า $R^2 = 0.952$ แสดงในภาพที่ 4.19

ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไอโซเทอมแบบพหุนคติช แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ สามารถดูดซับได้หลายชั้น เนื่องจากแรงแวน เดอร์ วาลส์ และแรงระหว่างประจุ ซึ่งเป็นแรงชนิดอ่อน



ภาพที่ 4.19 ไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ *E. coli* ในน้ำตัวอย่าง หลังการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางกายภาพ

วิธีการคำนวณสมการเส้นตรง คือ $y = mX + c$ และจากสมการพหุนคติช คือ $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$ เมื่อ $\log C$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ $c = \log K$ ดังนั้น $K = 10^c$ เมื่อนำค่า c และ m มาแทนในสมการจะได้ $K = 10^c$ และ $m = 1/n$ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.12

จากตารางที่ 4.12 พบว่าถ่านกัมมันต์จากซินไม้มีค่า K เท่ากับ 0.285 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้าที่มีค่า K เท่ากับ 0.232 มิลลิกรัมต่อกรัม จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จากซินไม้มีการดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า และค่าฟังก์ชันความแข็งแรงในการดูดซับ ($1/n$) ของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและจากซินไม้มีค่าเท่ากับ 0.126 และ 0.138 ตามลำดับ แสดงว่า ค่าความเข้มข้นของเชื้อ *E. coli* มีอิทธิพลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ และ

พบว่าถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าไม่มีค่า $1/n$ สูงกว่าถ่านกัมมันต์ทางการค้า อาจเนื่องมาจากขนาดของรูพรุนที่ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้าไม่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ทางการค้า และสอดคล้องกับงานวิจัยของสาวิตรี จันทรานุรักษ์และคณะ (2549) ที่กล่าวว่าค่า $1/n$ ที่ไม่สูง แสดงว่าการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ต่ำ (Faust and Aly, 1987) ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์ *E. coli* มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนขนาดกลางและขนาดเล็กของถ่าน จึงไม่สามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนได้ การดูดซับจึงเกิดขึ้นบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์และบางส่วนของรูพรุนขนาดใหญ่ของถ่านกัมมันต์ (Webster et al., 1997)

ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ของไอโซเทอมของการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์	เชื้อ <i>Escherichia coli</i>		
	R^2	K (mg/g)	$1/n$
ถ่านกัมมันต์การค้าจากกะละมะพร้าว	0.725	0.232	0.126
ถ่านกัมมันต์จากขี้เถ้า	0.952	0.285	0.138

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ผลการผลิตถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ

สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากชี้นไม้ด้วยวิธีกระตุ้นทางกายภาพ โดยใช้ถ่านชาร์จากชี้นไม้และนำมากระตุ้นในภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับไอน้ำ และอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 180 นาที ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณสมบัติ ดังนี้ มีค่า ค่าการดูดซับไอโอดีนเท่ากับ 581.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูเท่ากับ 27.891 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 317.95 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 1.49 นาโนเมตร และมีปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 0.118 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.1.2 การศึกษาผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและชี้นไม้

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย และค่าความแรงไอออนของสารละลาย โดยทำการกรองด้วยถังดูดซับแบบแท่ง ซึ่งได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลและทำการออกแบบการทดลองเป็น 2^3 แฟคทอเรียล ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ออกแบบและคำนวณโดยโปรแกรม Minitab 16th สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าว

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์การค้าจากกะลามะพร้าว ได้แก่ ปัจจัยหลักคือ อัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ (A) ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย (B) ค่าความแรงไอออนของสารละลาย (C) และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์กับค่าความเป็นกรด – ด่าง (AB) อันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายกับค่าความแรงไอออน (BC)

2. ถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพ

อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเชื้อ *E. coli* ของถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นทางกายภาพ ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ (A) ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย (B) ค่าความแรงไอออน (C) และอันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายกับค่าความแรงไอออน (BC) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์กับค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายกับค่าความแรงไอออนของสารละลาย (ABC)

5.1.3 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากซินไม้

1. อัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์

ในการทดลอง ทั้งถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวและจากซินไม้ ที่อัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์เท่ากับ 45 มิลลิลิตรต่อนาที จะให้ค่าการดูดซับที่สูงที่สุดและเมื่อเพิ่มความเร็วให้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การดูดซับเชื้อ *E. coli* ก็ลดลง สามารถสรุปได้ว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านถ่านกัมมันต์ต่ำ ถ่านกัมมันต์มีเวลาสัมผัสกับน้ำตัวอย่างได้นานยิ่งขึ้น ทำให้เชื้อมีโอกาสเกาะติดบริเวณรูพรุนหรือพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ได้มากยิ่งขึ้น

2. ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลาย

ในการทดลอง ทั้งถ่านกัมมันต์การค้าจากกะลามะพร้าวและจากซินไม้ ที่ค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายเท่ากับ 6 ซึ่งค่อนข้างต่ำ กรดเล็กน้อย จะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากค่าความเป็นกรด – ด่างของสารละลายที่เป็นกรด จะทำให้มีประจุบวกเพิ่มในสารละลายมากขึ้น ทำให้มีประจุบวกที่บริเวณผิวถ่านกัมมันต์ ช่วยทำให้เกิดกระบวนการดูดซับระหว่างเชื้อ *E. coli* ซึ่งมีประจุเป็นลบและถ่านกัมมันต์สูงขึ้น

3. ค่าความแรงไอออนของสารละลาย

ในการทดลอง ถ่านกัมมันต์การค้าจากกะลามะพร้าวและจากซินไม้ พบว่าการปรับค่าความแรงไอออนของสารละลายเท่ากับ 0.1 โมลต่อลิตร จะทำให้ความสามารถในการดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์กับเชื้อ *E. coli* เกิดได้สูงที่สุด เนื่องจากการเพิ่มความแรงไอออนในสารละลาย

ทำให้มีประจุบวกเพิ่มมากขึ้นบริเวณพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับกับเชื้อ *E. coli* ซึ่งบริเวณผิวมีประจุเป็นลบได้ดีขึ้น

5.1.4 การศึกษาปริมาณการดูดซับเชื้อ *E. coli* บนถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากซินไม้

ถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าว 1 กรัม มีความสามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้ 1.97×10^3 CFU/ml และถ่านกัมมันต์จากซินไม้ 1 กรัม มีความสามารถดูดซับเชื้อ *E. coli* ได้ 3.49×10^3 CFU/ml

5.1.5 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากซินไม้

ถ่านกัมมันต์ทางการค้าและซินไม้ มีสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช โดยค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทางการค้าจากกะลามะพร้าวจะเท่ากับ 0.232 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านกัมมันต์จากซินไม้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพจะเท่ากับ 0.285 มิลลิกรัมต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ถ่านกัมมันต์มาดูดซับจุลินทรีย์ในน้ำ ยังต้องได้รับการพัฒนาอีกมากเนื่องจากจุลินทรีย์ในน้ำมีมากมายหลายชนิดและปริมาณที่ปนเปื้อนไม่อาจคาดการณ์ได้ จำเป็นต้องหากระบวนการบำบัดน้ำอื่นมาพัฒนา อาจเป็นการบำบัดน้ำเบื้องต้นก่อนจะใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับจุลินทรีย์หรือการบำบัดต่อจากกระบวนการกรอง เพื่อสามารถนำน้ำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ควรมีการใช้ถ่านกัมมันต์อีกหลายชนิดมาใช้ดูดซับจุลินทรีย์ เนื่องจากขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีผลต่อการดูดซับจุลินทรีย์

3. ควรมีการพัฒนากระบวนการดูดซับ เพื่อนำไปสำหรับช่วยเหลือผู้ประสบเหตุภัยธรรมชาติ หรือเพื่อสำหรับการพาณิชย์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กษิต แผลมทองมงคล. 2551. การผลิตถ่านกัมมันต์อัดแท่งจากผลแอนทราไซต์ด้วยตัวประสานกากน้ำตาล.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

กองบริหารงานทั่วไป มหาวิทยาลัยมหิดล. เพาเวอร์พอยต์ ข้อมูลสถานการณ์น้ำท่วม ศาลายา ปี 2554. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.op.mahidol.ac.th/orga/flood.html>. [10 มีนาคม 2556]

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย (wastewater Treatment). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยรังสิต.

ชูไฮณี บินเยาะ. 2554. การดูดซับเมทานอลในกลีเซอรอลด้วยถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ณัฐยา พูนสุวรรณ. 2545. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากหินลิกไนต์และชานอ้อยโดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ณัฐวิภา จงรัก. 2554. การผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดลำไย โดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธราพงษ์ วิทิตตานต์. 2553. ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้. ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพถ่านกัมมันต์, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธวัชชัย สิงหศิริ. 2548. การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา เพื่อกำจัดโครเมียมและนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- บุญชัย ตระกูลมหชัย. 2537. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาตาลโตนดในฟลูอิดไดซ์เบด. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะพร บารมี. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริญทร เต็มถาวรศิลป์. 2551. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตงและไผ่หมาจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอินทรีย์ ภาควิชาเคมีบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรพรชกร ใจประดับเพชร. 2549. การกำจัดแคดมีียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวและเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ต้นทูลเวศม์. 2539. วิศวกรรมกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาวิตรี จันทรานุกรักษ์., วรณรักษ์ นพเจริญกุล., ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2549. ถ่านกัมมันต์จากกากนทะเลลายปาล์มน้ำมันและการดูดซับเชื้อ *Escherichia coli*. เรื่องเต็มการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 44: 151-158.
- สุรีย์ มีทอง. 2549. การปนเปื้อนของ *Escherichia coli* และ *Faecal Streptococci* ในผลิตภัณฑ์เนื้อไก่ปรุงสุกพร้อมบริโภคแช่เยือกแข็งและการพัฒนาแบบจำลองการล้างและกำจัดเชื้อในสายการผลิต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักงานป้องกันควบคุมโรคที่ 9 พิษณุโลก กรมควบคุมโรค. เผยแพร่ข่าวที่ร่วมพบผู้ป่วยโรคอาหารเป็นพิษ อุจจาระร่วง พุ่งสูงอันดับแรก. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: http://dpc9.ddc.moph.go.th/crd/news/tv/2554_10_30_dia.html. [10 มีนาคม 2556]

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์: Standard for activated carbon. มอก. 900-2547. กรุงเทพมหานคร.

อธิชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อกักเก็บ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภินิหาร ผิวพรรณ. 2551. การทำนายจุลินทรีย์ทั้งหมด โคลิฟอร์ม และ *Escherichia coli* ระหว่างการเตรียมและการจัดเก็บอาหารบริการประเภทสไลด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Alexander, T.J.L. 1994. Neonatal diarrhea in pig. pp. 151-170. United Kingdom: CAB international, Wallingford.

Andrew, W.H., Wilson, C.R., Poelma, P.I., Bullock, L.K., McClure, F.D., Gentile, D.E. 1981. Interlaboratory evaluation of the AOAC method and the A-1 procedure for recovery of coliforms from foods. Journal of Association Official Analytical Chemistry. 64: 1116.

Bansal, R.C., Donnect, J. and Stoeckli, F. 1988. Activated carbon. New York: Marcel Dekker, United states of America.

Bell, B.P., Goldoft, P.M., Griffin, P.M. Davis, M.A., Gordon, D.C., Tarr, P.I., Bartleleson, C.A., Lewis, J.H., Barrett, T.J., Well, R., Baron, K.J. 1994. A multistate outbreak of *Escherichia coli* O157:H7 associated bloody diarrhea and hemolytic uremic syndrome from hamburgers. Journal of the American Medical Association. 272: 1349-1353.

Blackburn, C.W. and McClure, P.J. 2003. Foodborne pathogens Hazards, risk analysis and control. New York: CRC Press.

- Black, R.E., Merson, M.H., Rowe, B., Taylor, P.R., Abdul-alim, A.R.M., Gross, R.J., Sack, D.A. 1981. Enteropathogenic *Escherichia coli* diarrhea acquired immunity and transmission in an endemic area. WHO. 59: 263-268.
- Busscher, H.J., Dijkstra, R.J. B., Langworthy, D.E., Collias, D.I., Bjorkquist, D W., Mitchell, M.D., Van der Mei, H. C. 2008. Interaction forces between waterborne bacteria and activated carbon particles. Journal of Colloid and Interface Science. 322:351-357.
- Camara, L.M., Carbonar, S.B., Silva, M.L.M., Carneiro-Sampalo, M.M.S. 1994. Inhibition of enteropathogenic *Escherichia coli* (EPEC) adhesion to HeLa cells by human colostrums:detection of specific slgA related to EPEC outer-membrane proteins. International Archeology Immunology. 103:307-310.
- Cheremisinoff, P.N., and Morresi, A.C. 1978. Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.
- Cookson, J.T., Jr. 1978. Adsorption mechanisms : the hemistry of organic adsorption on activated carbon. In Cheremisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. (eds.). Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.
- Cravioto, A., Tello, A., Villafan, H., Ruiz, J., Del-Vedovo, S., Neeser, J.R. 1991. Inhibition of localized adhesion of enteropathogenic *Escherichia coli* to HEp-2 cell by immunoglobulin and oligosaccharide fraction of human colostrums and breast milk. Journal of infection Diseases. 163: 1247-1255.
- Donnenberg, M.S., Giron, J.A., Kaper, J. B. 1992. A plasmid-encoded type IV fimbrial gene of enteropathogenic *Escherichia coli* associated with localized adherence. Molecular Microbiology. 6:3427-3437.
- Faust, S.D., and Aly, O.M. 1987. Adsorption Process for Water Treatment. MA: Butterworth Publisher.
- Fredrick, W.P. 1990. Water Quality and Treatment. 4th ed. New York: McGraw Hill.

- Forsythe, S. J. 2000. The microbiology of safe food. 1th ed. London: Blackwell Science.
- Griffin, P. M. 1995. Infections of gastrointestinal tract. 1th ed. New York: Raven press.
- Harris, J.R., Mariano, J., Wells, J.G., Payne, B.S., Donnel, H.D., Cohen, M.L. 1985. Person-to-person transmission in an outbreak of enteroinvasive *Escherichia coli*. American Journal of Epidemiology. 122: 245-252.
- Hassler, J.W. 1967. Activated Carbon. London: Leonard Hill.
- Henry, F.J., Udoy, A.S., Wanke, C.A., Aziz, M.A. 1996. Epidemiology of persistent diarrhea and Etiologic agent in Mirzpur, Bangladesh Acta Paediatr. 381: 27-31.
- Hijnen, W.A.M., Suyman, G.M.H., Brouwer-Hanzens, A., Medema, G.J. 2010. GAC adsorption filters as barriers for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water treatment. Water Research. 44:1224-1234.
- Jai Y.F. 1998. Adsorption of gold and silver species on activated carbon. Master's Thesis, University of Newcastle Upon Tyne, United Kingdom
- Juan Yang and Keqiang Qiu. 2010. Preparation of activated carbons from walnut shells via vacuum chemical activated and their application for methylene blue removal. Chemical Engineering Journal. 165: 209-217.
- Karmail, M.A., Steele, B.T., Petric, M., Lim, C. 1983. Sporadic cases of hemolytic uremic syndrome associated with faecal cytotoxin and cytotoxin-producing *Escherichia coli* in stools. Lancet. 1:619-620.
- Kim Hyon-Chong, Park Seong-Jik, Lee Chang-Gu, Kim Song-Bae, Kim Ki-Woo. 2009. Bacterial attachment to iron-impregnated granular activated carbon. Colloids and Surfaces B. 74:196-201.
- Levine, M.M., Ferreccio, Prado, V., Cayazzo, M., Abrego, P., Martinez, J., Maggi, L., Baldini, M. M., Martin, W., Maneval, D., Kay, B., Guers, L., Lior, H., Wasserman, S. S., Nataro, J. P., 1983. Epidemiologic studies of *Escherichia coli* diarrheal

- infections in a low socioeconomic level peri-urban community in Santiago, Chile. American Journal of Epidemiology. 138: 849-869.
- Lewis, R.J. 1997. Carbon, activated. Hawley's Condensed Chemical Dictionary. 13th ed. New York: John Wiley & sons.
- Long, K.Z., Wood, J.W., Vasquez-Gariby, E., Weiss, K.M., Mathewson, J.J., de la Cabada, F.J., Dupont, H.L., Wilson, R.A. 1994. Proportional hazards analysis of diarrhea due to enterotoxigenic *Escherichia coli* and breast feeding in a cohort of urban Mexican children. American journal of Epidemiology. 139: 193-205.
- Lyman, W.J. 1987. Applicability of carbon adsorption to the treatment of hazardous industrial wastes. In Chereminioff, P.N., and Ellerbusch, F. (Eds), Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.
- Marsh, H. 1997. Introduction to carbon technologies. Spain: Secretariado.
- Metcalf and Eddy, Inc. 1991. Wastewater engineering: treatment disposal reuse. 3th ed. New York: McGraw-Hill.
- Naruto, J. P., Kaper, J. B. 1998. Diarrheagenic *Escherichia coli*. Clinical Microbiology Reviews. 11(1):142-201.
- O'Brien, A. D., Holmes, R. K. 1987. Shiga-like toxins. Microbiology Review. 51: 206-220.
- Otowa, T., Tanibata, R. and Itoh, M. 1993 Production and adsorption characteristics of maxsorb : high-surface-area active carbon. Gas separation & purification. 7(4): 241-245.
- Pendyal, B., Johns, M.M., Marshall, W.E., Ahmedna, M. and Rao, R.M. 1999. The effect of binder and agricultural by-products on physical and chemical properties of granular activated carbon. Bioresource Technology. 68: 247-254.
- Montgomery, J.M. 1985. Water treatment principles and design. New York: John Wiley and sons.

- Pendyal, B., Johns, M.M., Marshall, W.E., Ahmedna, M. and Rao, R.M. 1999. The effect of binder and agricultural by-products on physical and chemical properties of granular activated carbon. Bioresource Technology. 68: 247-254.
- Riley, L.W., Remis, R.S., Helgerson, S.D., McGee, H.B., Wells, J.G., Davis, B.R., Hebert, R.J., Olcott, E.S., Johnson, L.M., Hargrett, N.T., Blake, P.A., Cohen, M.L. 1983. Hemorrhagic colitis associated with a rare *Escherichia coli* serotype. National English Journal of Medicine. 308: 681-685.
- Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K. S. W. 1999. Adsorption by poeders and porous solid: Principles methodology and application. London: Academic Press.
- Sears, C.L., Kaper, J.B. 1996. Enteric bacterial toxin: mechanisms of action and linkage to intestinal secretion. Microbiology Review. 60: 167-215.
- Snyder, J.D., Wells, J.G., Yashuk, J., Puhr, N., Blake, P.A. 1984. Outbreak of invasive *Escherichia coli* gastroenteritis on a cruise ship. American Journal of Tropical Medicine Hygiene. 139: 193-205.
- Upadhyayula, V.K.K., Deng, S., Smith, G.B., Mitchell, M.C. 2009. Adsorption of *Bacillus subtilis* on single-walled carbon nanotube aggregates, activated carbon and NanoCeramTM. Water research. 43:148-156.
- Utrilla, R.J., Toledo, B.I., Garcia, F.M.A., Castilla, C.M. 2001. Activated carbon surface modification by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. Journal of chemical technology and biotechnology. 76:1209-1215.
- WHO. 2000. Guidelines for safe recreation-water environment: volume 2: Swimming pools, spas and similar recreational-water environment: Final draft for consultation.
- Wood, L.V., Ferguson, E.L., Hogan, P., Thurman, D., DuPont, H.L., Ericsson, C.D. 1983. Incidence of bacterial enteropathogenes in foods from Mexico. Applied Environment Microbiology. 46: 328-332.

- Yamamoto, T., Kaneko, M., Changchawalit, S., Serichantalergs, O., Ijuin, S., Echeverria, P. 1994. Actin accumulation associated with clustered and localized adherence in *Escherichia coli* isolated from patients with diarrhea. Infection Immunology. 62: 2917-2929.
- Yao, K.M., Habbian, M.T. and O' Melia, C.R. 1971. Water and wastewater Filtration. Environmental Science and Technology. 5: 1105-1112.
- Yehaskel, A. 1978. Activated Carbon. Manufacture and Regeneration, Park Ridge, New Jersey: Noyes data Corporation.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน โดยสมมติว่าไอโอดีนเป็นสารพิษในน้ำ ตามวิธี มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

1. เครื่องมือ

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เตาอบอุณหภูมิ 110 - 150°C
- โถดูดความชื้น
- ขวดสีชา
- บิวเรตขนาด 50 mL
- ขวดปริมาตรรูปชมพู่ ขนาด 250 mL พร้อมจุกปิด
- บีเกอร์ขนาด 50 และ 250 mL
- กระจกตวงปริมาตร ขนาด 100 และ 500 mL
- กรวยกรอง
- ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL
- บีเปตขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 mL
- กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm

2. สารเคมี

2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เตรียมโดย ผสม Conc. HCl จำนวน 70 mL ในน้ำกลั่น 550 mL เขย่าผสมให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานโปรแตสเซียมไอโอเดต (KIO_3) ความเข้มข้น 0.1000N

เตรียมโดยอบ KIO_3 ที่อุณหภูมิ $110 \pm 5^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก 3.5667 ± 0.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 mL ถ่ายสารละลายลงขวดปริมาตรขนาด 1000 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL

2.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 0.100N

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 24.820 กรัม ละลายน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 mL เติมโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) จำนวน 0.10 ± 0.01 กรัม ถ่ายสารละลายลงขวดปริมาตรขนาด 1000 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL เก็บสารละลายในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการทดลองควรตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

2.4 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน ความเข้มข้น 0.100N

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนักไอโอดีน 12.7 กรัม และโปรแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.1 กรัม ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่น 50 mL ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะเพื่อให้สารทั้ง 2 ชนิดละลาย ถ่ายสารละลายลงขวดปริมาตรขนาด 1000 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL เก็บสารละลายในขวดสีชา และตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น 0.100N

2.5 สารละลายแป้ง

เตรียมโดยชั่งน้ำหนักแป้งมันจำนวน 1.0 กรัม ในน้ำเย็น 5 – 10 mL คนให้ละลายและเติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 mL เทลงน้ำเดือด 1 L ต้มต่อให้เดือดอีก 4 – 5 นาที น้ำแป้งที่เตรียมได้ควรใช้ให้หมดภายใน 1 วัน

3. การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

3.1 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

ปิเปตสารละลาย KIO_3 25 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ ชั่งน้ำหนัก KI จำนวน 2.0 กรัม เติมในสารละลาย เขย่าจะละลาย เติม Conc. HCl 5 mL ไทเทรตทันทีด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.100N จนสีของสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้จุดยุติ) หยคน้ำแบ่ง 2-3 หยด สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ ทำการตรวจสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จากสมการที่ ก.1

$$N_1 = \frac{(P \times R)}{S} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

P = ปริมาตรของสารละลาย KIO_3 (mL)

R = ความเข้มข้นของสารละลาย KIO_3 (N)

S = ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)

3.2 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ ไทเทรตทันทีด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.100N จนสีของสารละลายไอโอดีนเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้จุดยุติ) หยคน้ำแบ่ง 2-3 หยด สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ ทำการตรวจสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จากสมการที่ ก.2

$$N_2 = \frac{(S \times N_1)}{L} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)

S = ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)

N_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)

L = ปริมาตรสารละลายไอโอดีน (mL)

4. วิธีการหาค่าไอโอดีนนมเบอร์

4.1 บดถ่านกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบค่าไอโอดีนนมเบอร์ จนได้ขนาดที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 100 mesh ได้ 95% และสามารถผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 325 mesh ได้ 60%

4.2 นำถ่านกัมมันต์ที่ได้บดไปให้ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 – 120°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

4.3 ชั่ง และบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL

หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าน้อยกว่า เท่ากับ และมากกว่า 0.02

4.4 ปิเปตสารละลาย 5% HCl จำนวน 10 mL ใส่ขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุกเขย่าเบาๆ เพื่อสารละลายสัมผัสตัวอย่างอย่างทั่วถึง ปิดจุกตั้งบน hot plant ในตู้ดูดควัน จนสารละลายเดือดประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อกำจัดแก๊สหรือซัลเฟอร์ออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.001N จำนวน 100 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ปิดจุกขวดทันที เขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที ปิดจุกกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 โดยทิ้งสารละลาย 5 mL แรก เพื่อป้องกันการปนเปื้อน

4.6 ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรอง 50 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.100N จนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 mL ไทเทรตต่อจนสารละลายสีจากสีน้ำเงินเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้

4.7 คำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนหลังการดูดซับโดยตัวดูดซับ (C) จากสมการ ก.3

$$C = \frac{(N_2 \times S)}{F} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนหลังการดูดซับ (mL)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)

F = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนที่ใช้ (mL)

ค่า C ที่คำนวณต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.0008–0.0334 N ถ้าไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องทำการทดลองซ้ำ โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง โดยถ้าค่า C น้อยกว่าที่กำหนดต้องลดปริมาณถ่านกัมมันต์ตัวอย่างลง แต่ถ้าค่า C มากกว่าที่กำหนดต้องเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง จนได้ค่า C อยู่ในช่วงดังกล่าว

4.8 คำนวณหาค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) จากสมการ ก.4

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2.2B \times S)}{M} \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ X/M = ค่าการดูดซับจำเพาะ (mg/g)

$$A = N_1 \times 12693.0$$

$$B = N_2 \times 126.93$$

$$S = \text{ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ ที่ใช้ (mL)}$$

$$M = \text{น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง (g)}$$

นำค่า X/M ที่ได้ทั้ง 3 ค่า สร้างกราฟระหว่างแกน X คือ log C แกน y คือ log [X/M] ได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ตำแหน่งที่ C = 0.02 หรือ log C = 1.699 ทำให้ทราบค่าบนแกน y โดยสมมติให้เท่ากับ Y นำค่าที่ได้คำนวณหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (I₂ No.) ดังสมการ ก.5

$$I_2 \text{ No.} = 10^Y \quad (\text{ก.5})$$

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (ASTM)

M (g)				M (g)			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ (ASTM)

M (g)				M (g)			
E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03	E	C = 0.01	C = 0.02	C = 0.03
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.625	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.460
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.386	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.779	0.683	0.586	2700	0.148	0.367	0.315
1500	0.753	0.660	0.567	2750	0.411	0.360	0.309

ก.2 วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำ ตามวิธี JIS 1470-1975 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือที่ใช้

- เครื่องเขย่าตามแนวราบ
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง
- เครื่องเซนติฟิวจ์

2. วิธีเตรียมสารละลาย

2.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- ออบโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที

- ชั่งมา 9.0 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 mL ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ A

- ออบโซเดียมโมโนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที

- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 mL ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ B

- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 mL กวนให้เข้ากัน จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

3. สารละลายเมทิลีนบลู

3.1 การเตรียม

อบสารเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที ชั่งมา 1.2060 กรัม (สมมุติว่ามีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1. จนมีปริมาตรเป็น 4,000 mL สารละลายที่ได้นี้มีความเข้มข้น 0.3000 mg/g กวนสารละลายอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปใช้

3.2 วิธีสร้างกราฟมาตรฐาน

ดูดสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้ มา 5.0 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 50 mL ให้สารละลายนี้ คือ M ซึ่งมีความเข้มข้น 0.3000 มิลลิกรัมต่อกรัม เจือจางสารละลาย M ให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้

ดูดมา 1.0 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00030 mg/mL

ดูดมา 1.5 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00045 mg/mL

ดูดมา 2.0 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00060 mg/mL

ดูดมา 2.5 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00075 mg/mL

ดูค่า 3.0 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00090 mg/mL

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 nm บันทึกค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟระหว่างแกนราบ คือ ความเข้มข้นในหน่วย 100 mg/mL แกนตั้งฉาก คือ ค่าการดูดกลืน จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $\tan \theta$

หมายเหตุ ค่า $\tan \theta$ เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายที่เตรียมได้ ในการทดลองนี้กำหนดว่าค่าดังกล่าวต้องอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.2 เท่านั้น ถ้าไม่ได้ค่าตามนี้ให้ถือว่าสารละลายที่เตรียมมาใช้ไม่ได้

3.3 วิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 250 μm (No. 60)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C นาน 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักเท่ากับ D ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความละเอียด 0.1 mg) ในขวดชมพูขนาด 300 mL ซึ่งมีจุกปิด
- ใส่สารละลายเมทธิลีนบลู 50 mL ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ 10 วินาที สังเกตดูว่าสีของสารละลายเจือจางหรือไม่ ถ้าเจือจางให้ใส่สารละลายเมทธิลีนบลูลงไปอีก ครึ่งละ 50 mL
- เมื่อสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้ใส่สารละลายเพิ่มอีก 50 mL เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลของการดูดซับเท่ากับ 0.3 mg/g แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
- เทสารละลายส่วนบนลงในหลอดเซนติฟิวจ์ แล้วนำไปเซนติฟิวจ์ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที
- ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 mL (ค่าคงที่ของการเจือจาง, $C = 100/0.5 = 200$) ถ้าวัดการดูดกลืนแสง แล้วอยู่นอกช่วงของกราฟมาตรฐาน ให้เพิ่มปริมาตรหลังการเจือจาง เช่น เจือจางเป็น 200 mL ($C = 400$) เป็นต้น
- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 nm

ค่าการดูดกลืนแสง (Methylene blue adsorption, MB) (มิลลิกรัมต่อกรัม) คำนวณได้จาก

$$\text{MB (mg/g)} = [0.3000A/D] - [ABC/100D \tan \theta]$$

โดย A = ปริมาตรของสารละลายเมทิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น, mL

B = ค่าการดูดกลืนแสง

C = ค่าคงที่ของการเจือจาง = 200 (หรือ 400)

ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์

ข.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น ของ Na ₂ S ₂ O ₃	ความ เข้มข้นของ I ₂	A	B	น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์	ปริมาตร ของ Na ₂ S ₂ O ₃	C	X/M (mg/g)	Log (C)	Log (X/M)	I ₂ No. (mg/g)
Wood	0.101215	0.102881	1284.717	13.05864	3.7680	7.00	0.01452	287.5783	-1.8379	2.4587	581.15
					3.3039	7.47	0.01549	323.9223	-1.8099	2.5104	
					2.8353	7.87	0.01632	373.3962	-1.7872	2.5721	
Coconut	0.101215	0.102881	1284.717	13.05864	3.2287	6.43	0.01327	340.6615	-1.8746	2.5323	617.17
					2.8309	7.00	0.01452	382.7804	-1.8379	2.5829	
					2.4302	7.63	0.01583	438.4082	-1.8003	2.6418	

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการดูดซับเชื้อ *E. coli* จากปัจจัยค่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์บนถ่านกัมมันต์ทางการค้า

ความเร็ว	%คงเหลือ	% ดูดซับ	% ดูดซับเฉลี่ย	SD
45	62.5	37.50	33.84	3.67
	66.13	33.87		
	69.84	30.16		
50	78.14	21.86	22.78	2.58
	74.3	25.70		
	79.23	20.77		
55	77.43	22.57	20.53	1.80
	80.86	19.14		
	80.12	19.88		

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการดูดซับเชื้อ *E. coli* จากปัจจัยค่าความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถ่านกัมมันต์บนถ่านกัมมันต์จากจีนไม้

ความเร็ว	%คงเหลือ	% ดูดซับ	% ดูดซับเฉลี่ย	SD
45	43.35	56.65	53.30	3.13
	49.56	50.44		
	47.18	52.82		
50	57.54	42.46	46.09	3.18
	52.63	47.37		
	51.56	48.44		
55	65.9	34.1	32.95	4.09
	63.65	36.35		
	71.59	28.41		

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการดูลดเชื้อ *E. coli* จากปัจจัยค่าเป็นกรด – ต่างของสารละลายบน ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

pH	%คงเหลือ	% ดูลดเชื้อ	% ดูลดเชื้อเฉลี่ย	SD
6	63.75	36.25	48.25	11.27
	50.13	49.87		
	41.37	58.63		
7	58.98	41.02	39.85	5.42
	54.10	45.90		
	66.50	33.50		
	60.28	39.72		
8	61.20	38.80	39.15	10.00
	70.68	29.32		
	50.68	49.32		

ตารางที่ ข.5 แสดงผลการดูลดเชื้อ *E. coli* จากปัจจัยค่าเป็นกรด – ต่างของสารละลายบน ถ่านกัมมันต์จากจีนไม่

pH	%คงเหลือ	% ดูลดเชื้อ	% ดูลดเชื้อเฉลี่ย	SD
6	37.26	62.74	61.01	1.70
	40.67	59.33		
	39.04	60.96		
7	52.43	47.57	51.07	3.22
	46.07	53.93		
	48.29	51.71		
8	51.78	48.22	48.62	2.95
	48.25	51.75		
	54.11	45.89		

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการดูดซับเชื้อ *E. coli* จากปัจจัยค่าความแรงไอออนของสารละลายบน ถ่านกัมมันต์ทางการค้า

Ionic strength	% คงเหลือ	% ดูดซับ	% ดูดซับเฉลี่ย	SD
0.1	58.33	41.67	35.33	5.55
	67.02	32.98		
	68.66	31.34		
0.05	80.92	19.08	28.91	8.57
	65.15	34.85		
	67.21	32.79		
0.01	82.35	17.65	23.51	6.34
	69.75	30.25		
	77.36	22.64		

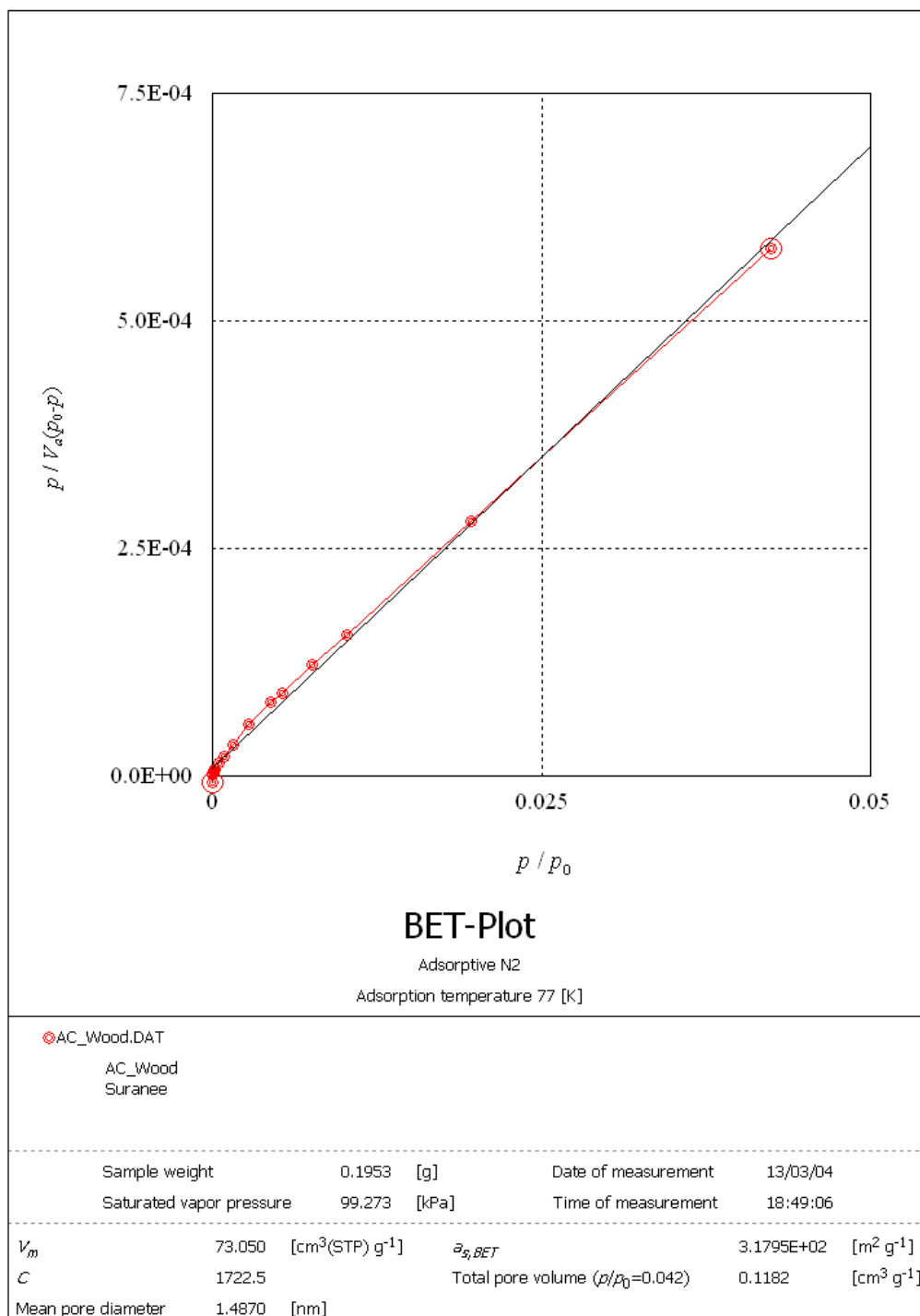
ตารางที่ ข.7 แสดงผลการดูดซับเชื้อ *E. coli* จากปัจจัยค่าความแรงไอออนของสารละลายบน ถ่านกัมมันต์จากจีนไม่

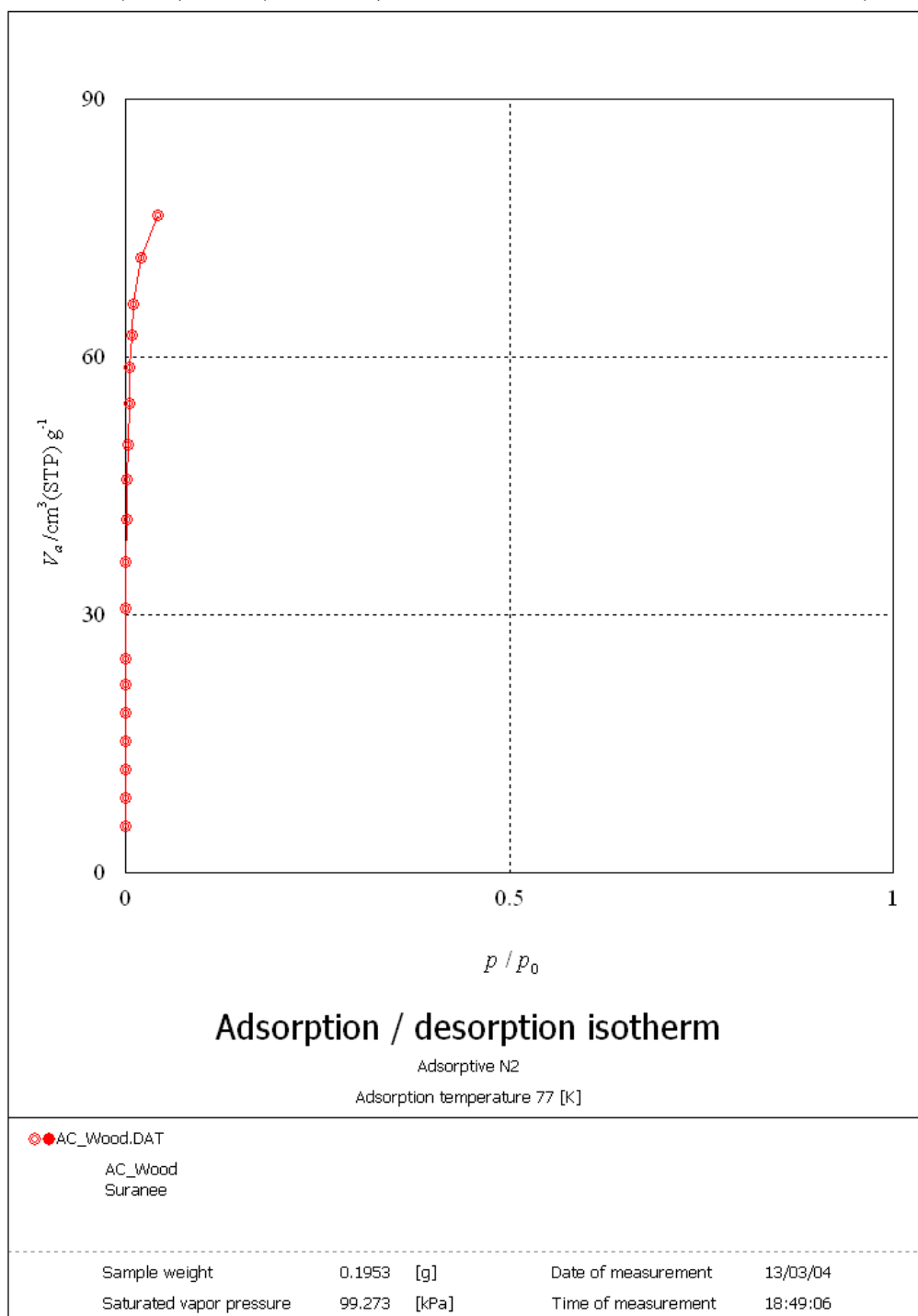
Ionic strength	%คงเหลือ	% ดูดซับ	% ดูดซับเฉลี่ย	SD
0.1	29.07	70.93	67.87	3.79
	36.38	63.62		
	30.93	69.07		
0.05	41.45	58.55	57.85	3.62
	46.07	53.93		
	38.93	61.07		
0.01	47.5	52.50	54.17	1.90
	43.75	56.25		
	46.23	53.77		

ผลการวิเคราะห์ BET

[5.3.3.0] Belsorp Adsorption/Desorption Data Analysis Software

BEL Japan, Inc.





ภาคผนวกค.

การคำนวณ Ionic Strength และ Buffer

ค.1 การคำนวณ Ionic Strength

Molins (1991) ได้กล่าวถึงวิธีคำนวณค่า Ionic Strength ว่าสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{Ionic Strength } (\mu) = (1/2) \sum MZ^2$$

เมื่อ M คือ จำนวนโมลของอะตอม

Z คือ เลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของอะตอม

Ionic Strength ของเกลือ NaCl

1. ความเข้มข้น 0.1 mol/L

NaCl มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ $23+35 = 58$

ใช้ NaCl 5.8 กรัม คิดเป็นหน่วยโมลาร์ (Molar : M) เท่ากับ $5.8/58 = 0.1 \text{ M}$

NaCl มีเลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของ Na = 1, Cl = 1

$$\text{แทนค่าในสูตร } (\mu) = (1/2) \times [(0.1 \times 1^2) + (0.1 \times 1^2)]$$

$$= 0.1$$

เพราะฉะนั้น สารละลาย 0.1 mol/L ใช้ NaCl 5.8 กรัม

2. ความเข้มข้น 0.05 mol/L

NaCl มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ $23+35=58$

ใช้ NaCl 2.9 กรัม คิดเป็นหน่วยโมลาร์ (Molar : M) เท่ากับ $2.9/58 = 0.05$ M

NaCl มีเลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของ Na = 1, Cl = 1

$$\begin{aligned}\text{แทนค่าในสูตร } (\mu) &= (1/2) \times [(0.05 \times 1^2) + (0.05 \times 1^2)] \\ &= 0.05\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น สารละลาย 0.05mol/L ใช้ NaCl 2.9 กรัม

3. ความเข้มข้น 0.01 mol/L

NaCl มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ $23+35=58$

ใช้ NaCl 0.58 กรัม คิดเป็นหน่วยโมลาร์ (Molar : M) เท่ากับ $0.58/58 = 0.01$ M

NaCl มีเลขวาเลนซ์อิเล็กตรอนของ Na = 1, Cl = 1

$$\begin{aligned}\text{แทนค่าในสูตร } (\mu) &= (1/2) \times [(0.01 \times 1^2) + (0.01 \times 1^2)] \\ &= 0.01\end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น สารละลาย 0.01mol/L ใช้ NaCl 0.58 กรัม

ค.2 การคำนวณ Buffer สำหรับเป็นสารละลายปรับค่าความเป็นกรด – ด่าง

จากสูตร

$$\text{โมล} = \frac{\text{น้ำหนักสาร}}{\text{น้ำหนักโมเลกุล}}$$

โดย โซเดียม ไดไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (NaH_2PO_4) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 156.01

ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (Na_2HPO_4) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 178.00

โซเดียม ไดไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (NaH_2PO_4)

เตรียมสารละลาย 0.2 โมล

$$\text{แทนค่าในสูตร โมล} = \text{น้ำหนักสาร/น้ำหนักโมเลกุล}$$

$$\text{น้ำหนักสาร} = 0.2 \times 156.01$$

$$= 31.2 \text{ g/L}$$

ไดโซเดียม ไฮโดรเจน ออโรฟอสเฟต (Na_2HPO_4)

เตรียมสารละลาย 0.2 โมล

$$\text{แทนค่าในสูตร โมล} = \text{น้ำหนักสาร/น้ำหนักโมเลกุล}$$

$$\text{น้ำหนักสาร} = 0.2 \times 178.00$$

$$= 35.6 \text{ g/L}$$

ภาคผนวก ง.

สูตรและวิธีการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ

อาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Nutrient Broth (NB)

Bacto peptone	5.0	กรัม
Beef Extract	3.0	กรัม

ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มล.ผสมให้เข้ากันนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

อาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient agar (NA)

Bactopeptone	5.0	กรัม
Beef Extract	3.0	กรัม
Agar	15.0	กรัม

ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มล.ผสมให้เข้ากันนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาทีทิ้งให้อาหารเย็นลงประมาณ 50 องศาเซลเซียส เทอาหารลงในจานเพาะเชื้อ (petri dish) ทิ้งไว้จนกระทั่งอาหารเย็นและแข็ง

อาหาร Lauryl tryptose broth (LTB)

Tryptose	20.0	กรัม
Sodium chloride	5.0	กรัม
Lactose	5.0	กรัม
Dipotassium phosphate	2.75	กรัม
Monopotassium phosphate	2.75	กรัม
Sodium lauryl sulfate	0.1	กรัม

pH 6.8±0.2

ละลายส่วนผสมตามที่กล่าวทั้ง 35.6 กรัมลงในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับ pH ของอาหารให้อยู่ในช่วงที่กำหนด ปิเปตอาหารปริมาตร 9, 9.9 และ 9.99 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง แต่ละปริมาตรจำนวน 3 หลอด ใส่หลอดดักก๊าซ (Durham tube) โดยคว่ำหลอดดักก๊าซลงในอาหาร ปิดจุกสำลี และนำไปนึ่งฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

อาหาร Eosin methylene blue agar (EMB)

Bacteriological Peptone	10.0	กรัม
Sucrose	5.0	กรัม
Lactose	5.0	กรัม
Dipotassium phosphate	2.0	กรัม
Eosin Y	0.4	กรัม
Methylene blue	0.065	กรัม
Bacteriological agar	13.5	กรัม

pH 7.2±0.2

ละลายส่วนผสมตามด้านบนในน้ำกลั่นปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับ pH ของอาหารให้อยู่ในช่วงที่กำหนด จากนั้นนำไปนึ่งฆ่าเชื้อในหม้อนึ่งความดัน (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ให้นำอาหารเย็นลงประมาณ 50 องศาเซลเซียส เทอาหารลงในจานเพาะเชื้อ (petri dish) ที่ไว้จนกระทั่งอาหารเย็นและแข็ง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุพัฒน์ เฟื่องพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 14 สิงหาคม 2530 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจาก สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่ หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 โดยได้เผยแพร่ผลงานเรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ *Escherichia coli* บน ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ที่งานประชุมวิชาการครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม เมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ. 2555