

# นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม

## ENVIRONMENTAL NANOTECHNOLOGY

พวรัตน์ ขจิตวิชยานุกูล



สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร  
Naresuan University Publishing House  
[www.nupress.grad.nu.ac.th](http://www.nupress.grad.nu.ac.th)

## ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

### National Library of Thailand Cataloging in Publication Data

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล.

นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม .— พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2557.  
563 หน้า.

1. นาโนเทคโนโลยี. I. ชื่อเรื่อง.

620.5

ISBN 978-616-7902-08-1

สพน. 002

## นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล



สงวนลิขสิทธิ์โดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

พิมพ์ครั้งที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2557 จำนวนพิมพ์ 500 เล่ม ราคา 450 บาท

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

**ผู้จัดพิมพ์** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

**ผู้จัดจำหน่าย** 1. ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาคารวิทยกิตติ ชั้น 14 ซอยจุฬาลงกรณ์ 64 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

**สาขา** ศาลาพระแก้ว โทร. 0-2218-7000-3

สยามสแควร์ โทร. 0-2218-9881, 0-2255-4433

มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทร. 044-216131-2

มหาวิทยาลัยบูรพา โทร. 0-3839-4855-9

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (รร.จปร.) โทร. 037-393-023, 037-393-036

จัตุรัสจามจุรี โทร. 0-2160-5301

รัตนานิเบศร์ โทร. 0-2950-5408-9

มหาวิทยาลัยพะเยา โทร. 0-5446-6799, 0-5446-6800

ย่อยคณะครุศาสตร์จุฬาฯ โทร. 0-2218-3979

2. เสียงทิพย์บุ๊กเซ็นเตอร์ 108/3-5 เอกาทศรัฐ ตำบลในเมือง อำเภอเมืองพิษณุโลก  
พิษณุโลก 65000 โทร. 0-5525-8862

**สาขา** มหาวิทยาลัยนเรศวร (หน้าหอใน อาคารขวัญเมือง) โทร. 0-5526-1616

ICT (หน้าโรงพยาบาลพิษณุเวช พิษณุโลก) โทร. 084-814-7800

**กองบรรณาธิการ** กองบรรณาธิการจัดทำเอกสารสิ่งพิมพ์ทางวิชาการของสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร

**ออกแบบปกและรูปเล่ม** สรญา แสงเย็นพันธ์

**พิมพ์ที่** รัตนสุวรรณการพิมพ์ 3 30-31 ถนนพญาภิไธ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 โทร. 0-5525-8101

ปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมจัดเป็นปัญหาที่สำคัญของประเทศไทยที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องนับแต่ครั้งโบราณกาลและทวีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ในอดีตปัญหามลพิษที่สำคัญมักเป็นปัญหามลพิษน้ำเสีย อากาศเสีย และขยะมูลฝอย เมื่อมีการพัฒนาทางอุตสาหกรรมและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ปัญหาของอากาศของเสียอันตราย การปนเปื้อนของสารเคมี และการขาดแคลนน้ำสะอาดเพื่อการบริโภคและอุปโภคได้ กลายมาเป็นปัญหามลพิษที่ทวีความสำคัญมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ปัญหามลพิษดั้งเดิมที่เคยมีนั้นยังคงปรากฏอยู่

ในขณะเดียวกันการค้นคว้าวิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีที่จะนำมาสู่หนทางในการแก้ปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมนั้นได้พัฒนาอย่างก้าวกระโดดเช่นเดียวกันกับปัญหามลพิษที่เกิดขึ้น แนวทางในอดีตในการรับมือปัญหามลพิษนั้นเป็นแนวทางเชิงรับในการรวบรวม บำบัดและกำจัดสารมลพิษ หรือที่ปลายเหตุ (end-of-pipe) และได้ปรับมาเป็นการป้องกันการเกิดมลพิษ ร่วมกับการบำบัดและกำจัดมลพิษ ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแนวทางในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมเชิงรุกด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับป้องกันและบำบัดมลพิษในลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันในปัจจุบัน เช่น เครื่องปรับอากาศและตู้เย็นที่กำจัดเชื้อโรค พื้นถนนที่กำจัดไอควันพิษ ผงซักฟอกที่กำจัดจุลินทรีย์และเชื้อรา เครื่องกรองน้ำขนาดเล็กสำหรับก๊อบน้ำที่กำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้ ไปจนกระทั่งเสื้อปลอดกลิ่น รวมทั้งวิธีการบำบัดและกำจัดสารพิษในแนวทางใหม่ที่หลากหลาย ตลอดจนการผสมผสานกับการนำแสงอาทิตย์มาเป็นแหล่งพลังงานในการกำจัดมลพิษนั้นๆ การพัฒนาเทคโนโลยีแนวทางใหม่ในเชิงรุกนี้เกิดขึ้นจากการพัฒนาวิทยาการความก้าวหน้าของ “นาโนเทคโนโลยี” มาประยุกต์ใช้ในงานด้านสิ่งแวดล้อมนั่นเอง

การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในงานสิ่งแวดล้อมนั้นดูเหมือนว่าจะจะเป็นศาสตร์ใหม่ที่หลายคนไม่คุ้นเคยนัก ในความเป็นจริงแล้วพื้นฐานของการนำแนวทางในการนำเทคโนโลยีนี้มาจากการพัฒนาวัสดุให้มีขนาดเล็กลงในระดับนาโนโดยมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ได้ลักษณะสมบัติใหม่ เช่น มีสมบัติทางแม่เหล็ก มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา สามารถดูดกลืนคลื่นแสงวิซิเบิลได้ และนำลักษณะสมบัติใหม่ของวัสดุนาโนนั้นๆ มาใช้งานบนพื้นฐานปฏิกิริยาทางเคมี หรือเคมีกายภาพ ที่มีอยู่เดิม เช่น กระบวนการดูดซับปฏิกิริยารีดอกซ์ โฟโตเคมี (photochemistry) ซึ่งการนำวัสดุนาโนไปใช้งานด้วยปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้ต้องมีการพัฒนา ปรับปรุง และประยุกต์แนวทางการนำไปใช้ในการป้องกัน บำบัด และกำจัดมลพิษขึ้นใหม่ ซึ่งนำไปสู่เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นและใช้งานในรูปของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในปัจจุบัน

ผู้เขียนจึงได้รวบรวมความรู้และประสบการณ์ในการทำงานวิจัยทั้งของตนเองและงานวิจัยของนักวิจัยในด้านนี้เพื่อนำมาเขียนหนังสือ “นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม” นี้ โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเผยแพร่ความรู้ทั้งในส่วน of ความรู้พื้นฐานของวัสดุนาโน กลไกและปฏิกิริยาที่นำไปสู่การใช้วัสดุนาโนในการป้องกัน บำบัด และกำจัดมลพิษ ซึ่งนำไปสู่การเกิดผลิตภัณฑ์เพื่อการป้องกันสิ่งแวดล้อมในเชิงรุก และความปลอดภัยของวัสดุ



นาโนต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ซึ่งเป็นประเด็นที่ต้องตระหนักอย่างมากในการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้งาน เพื่อไม่ให้วัสดุนาโนที่สร้างประโยชน์อย่างมากนี้มาเป็นปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมที่ต้องมาแก้ไขปัญหากันในภายหลัง โดยมุ่งหวังว่าความรู้และประสบการณ์จากงานวิจัยที่ปรากฏในเล่มนี้จะนำไปสู่การจุดประกายให้มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาศาสตร์ในด้านนี้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมให้กับประเทศไทยมากยิ่งขึ้น

อนึ่ง เป็นที่น่ายินดีอย่างมากที่ในปัจจุบันที่มหาวิทยาลัยหลายแห่งได้มีการเปิดวิชาที่มีเรียนการสอนวิชาความรู้ “นาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อม” นี้ ในหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมระดับบัณฑิตศึกษา หนังสือเล่มนี้จะเป็นคู่มือการเรียนรู้และแนวทางที่ดีให้กับนิสิต นักศึกษา ตลอดจนผู้เริ่มค้นคว้าวิจัยในการที่จะเรียนรู้ศาสตร์ในด้านนี้เพื่อประโยชน์ในการช่วยกันพัฒนาเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมของประเทศอย่างจริงจังต่อไป

ผู้เขียนขอขอบคุณผู้อ่านและนักวิจัยทุกท่านที่ได้นำเนื้อหาและความรู้ในเล่มนี้ไปใช้งานและพัฒนาต่อไป โดยเนื้อหาที่ปรากฏอยู่ในเล่มนี้อ้างอิงตามข้อมูล ณ เวลาปัจจุบันที่ได้จัดทำขึ้น หากมีข้อมูลใดที่คลาดเคลื่อนหรือขาดความสมบูรณ์ในเนื้อหา ผู้เขียนขออภัยมา ณ ที่นี้และยินดีน้อมรับคำติชมเพื่อพัฒนาหนังสือเล่มนี้ให้ดียิ่งขึ้นไปในอนาคต

พวงรัตน์ ขจิตวิษยานุกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผู้เขียนขอขอบคุณ Prof.Dr. Krishnan Rajeshwar, Prof.Dr. Syed R Qasim และ รศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ผู้อบรมสั่งสอนและเริ่มต้นงานวิจัยในด้านนี้ให้กับผู้เขียน ตลอดจนให้คำปรึกษา และชี้แนะแนวทางในการเขียนหนังสือเล่มนี้ และขอขอบคุณ Prof.Dr. Supapan Seraphin ผู้เป็นทั้งพี่เลี้ยง งานวิจัยและพันธมิตรร่วมวิจัยที่ให้ความรู้ในการบูรณาการทั้งศาสตร์และศิลป์ของวัสดุศาสตร์เข้ากับวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม

ขอขอบคุณ ศ.ดร.สันติ แม้นสิริ รศ.ดร.พิศิษฐ์ สิงห์ใจ และ Dr. Binh Doung ผู้อำนวยความสะดวก ข้อมูล ความรู้และภาพถ่ายวัสดุนาโนเพื่อใช้ในหนังสือเล่มนี้ ขอขอบคุณ ดร.วิไลวรรณ จันทรมณี และดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์ ผู้ตรวจสอบความถูกต้องและความสมบูรณ์ของเนื้อหา และขอขอบคุณ ดร.จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย ผู้ร่วมแก้ไข ตรวจสอบเนื้อหา จัดทำภาพประกอบและรูปเล่มของหนังสือ

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยนเรศวร ในการสนับสนุนความตั้งใจ เวลา และงบประมาณ สนับสนุนให้มีหนังสือเล่มนี้ และขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัวที่ให้ความรัก ความอบอุ่น เป็นพลัง และกำลังใจให้ผู้เขียนสามารถจัดทำหนังสือเล่มนี้จนเสร็จสิ้นตามที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้ เพื่อให้หนังสือเล่มนี้ มีความสมบูรณ์และเหมาะสมในการเผยแพร่ความรู้และงานวิจัยที่จะนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดเทคโนโลยี ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมของบ้านเราต่อไป

---

Prof.Dr. Krishnan Rajeshwar, Prof.Dr. Syed R Qasim และ ดร.วิไลวรรณ จันทรมณี จาก The University of Texas at Arlington, USA., Prof.Dr. Supapan Seraphin จาก The University of Arizona, USA. และ Dr. Binh Doung จาก Worcester Polytechnic Institute, USA.

รศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ศ.ดร.สันติ แม้นสิริ และ ดร.อภิชน วัชรินทร์วงศ์ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, รศ.ดร.พิศิษฐ์ สิงห์ใจ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และดร.จิรภัทร์ อนันต์ภัทรชัย จากมหาวิทยาลัยนเรศวร

	หน้า
คำนำ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญคำย่อ	ญ
<b>บทที่ 1 ความสำคัญของนาโนเทคโนโลยีในการป้องกันและกำจัดมลพิษในสิ่งแวดล้อม</b>	
1.1 ความจำเป็นในการใช้นาโนเทคโนโลยีในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	2
1.2 ความเข้าใจพื้นฐานของนาโนเทคโนโลยี	7
1.3 ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้นาโนเทคโนโลยีในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	11
1.4 ผลกระทบเชิงลบของวัสดุนาโนที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและมนุษย์	17
1.5 แนวทางการลดผลกระทบเชิงลบของวัสดุนาโนที่มาจากการใช้งานด้านบำบัดและกำจัดมลพิษ	20
เอกสารอ้างอิง	21
<b>บทที่ 2 ลักษณะพื้นฐานและคุณสมบัติของวัสดุนาโน</b>	
2.1 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของวัสดุนาโน	26
2.2 พื้นที่ผิวของอนุภาคนาโน	29
2.3 เคมีพื้นผิวอนุภาคนาโน	32
2.4 การละลายน้ำของอนุภาคนาโน	38
2.5 ลักษณะสมบัติของการเป็นสารดูดซับ	39
2.6 ลักษณะสมบัติการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	42
2.7 ลักษณะสมบัติทางแม่เหล็ก	44
2.8 ลักษณะสมบัติ surface plasmon resonance	45
2.9 เครื่องมือในการวัดและลักษณะสมบัติของวัสดุนาโนที่ได้	47
2.9.1 กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจวัดลักษณะสมบัติวัสดุนาโน	51
2.9.2 การวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ และลักษณะสมบัติวัสดุนาโนที่ได้	58
เอกสารอ้างอิง	66



	หน้า
<b>บทที่ 3 กระบวนการพื้นฐานในการบำบัดและกำจัดสารมลพิษด้วยวัสดุนาโน</b>	
3.1 กระบวนการดูดซับ	72
3.1.1 สมดุลของการดูดซับและไอโซเทอม	75
3.1.2 จลนศาสตร์ของการดูดซับ	81
3.2 กระบวนการรีด็อกซ์พื้นฐาน	85
3.3 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง	87
3.3.1 การเกิดไฮดรอกซิลราดิคอลลจากปฏิกิริยาต่างๆ	90
3.3.2 กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล	96
3.4 กระบวนการรีดักชันทางเคมี	99
3.5 กระบวนการคะตะไลซิส และโฟโตคะตะไลซิส	102
3.5.1 ปฏิกิริยาโฮโมจีเนียสคะตะไลซิส	102
3.5.2 ปฏิกิริยาเฮเทอโรจีเนียสคะตะไลซิส	107
เอกสารอ้างอิง	117
<b>บทที่ 4 วัสดุนาโนและกลไกปฏิกิริยาในการบำบัดและกำจัดมลพิษ</b>	
4.1 ไททาเนียมไดออกไซด์และโลหะออกไซด์	124
4.1.1 ลักษณะสมบัติของไททาเนียมไดออกไซด์	124
4.1.2 กลไกและปฏิกิริยาในการบำบัดและกำจัดมลพิษของไททาเนียมไดออกไซด์	126
4.1.3 การนำไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้งานในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	142
4.1.4 วัสดุนาโนโลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	148
4.2 อนุภาคนาโนไอรอนออกไซด์	153
4.2.1 ลักษณะสมบัติอนุภาคนาโนไอรอนออกไซด์	153
4.2.2 กลไกและปฏิกิริยาในการกำจัดมลพิษของอนุภาคนาโนไอรอนออกไซด์	160
4.2.3 การนำอนุภาคนาโนไอรอนไปใช้งานในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	164
4.2.4 การแยกอนุภาคนาโนไอรอนออกไซด์ออกจากน้ำเสียและตะกอน	165
4.2.5 การฟื้นฟูประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนไอรอนออกไซด์	167
4.3 อนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์	167
4.3.1 ลักษณะสมบัติอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์	167
4.3.2 กลไกและปฏิกิริยาในการกำจัดมลพิษของอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์	168
4.3.3 การนำอนุภาคนาโนเหล็กประจุศูนย์ไปใช้งานในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	172



	หน้า
4.4 วัสดุซิลิกาและซีโอไลต์	174
4.4.1 ลักษณะสมบัติของวัสดุซิลิกาและซีโอไลต์	174
4.4.2 กลไกและปฏิกิริยาในการกำจัดมลพิษของวัสดุนาโนซีโอไลต์และซิลิกา	181
4.4.3 การนำซีโอไลต์ไปใช้งานในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	184
4.5 วัสดุนาโนคาร์บอน	186
4.5.1 ลักษณะสมบัติของวัสดุนาโนคาร์บอน	186
4.5.2 กลไกและปฏิกิริยาในการบำบัดและกำจัดมลพิษของวัสดุนาโนคาร์บอน	193
4.5.3 การนำวัสดุนาโนคาร์บอนไปใช้งานในการบำบัดและกำจัดมลพิษ	196
4.6 นาโนซิลเวอร์	198
4.6.1 ลักษณะสมบัตินาโนซิลเวอร์	198
4.6.2 กลไกในการกำจัดเชื้อโรคและการนำไปใช้งาน	199
4.7 การใช้วัสดุนาโนผสมในการบำบัดและกำจัดสารมลพิษ	201
เอกสารอ้างอิง	205
<b>บทที่ 5 การบำบัดและกำจัดโลหะหนักจากตัวกลางสิ่งแวดล้อมด้วยวัสดุนาโน</b>	
5.1 โลหะหนักและลักษณะสมบัติ	226
5.2 ปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานของโลหะหนัก	232
5.3 การกำจัดโลหะหนักด้วยวัสดุนาโนไททานเนียมไดออกไซด์	236
5.3.1 กลไกและปฏิกิริยาทางเคมี	236
5.3.2 ปัจจัยและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก	246
5.4 การกำจัดโลหะหนักด้วยท่อนาโนคาร์บอน	252
5.4.1 กลไกและปฏิกิริยาเคมี	252
5.4.2 ปัจจัยและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก	256
5.5 การกำจัดโลหะหนักด้วยเหล็กนาโนประจุศูนย์	258
5.5.1 กลไกและปฏิกิริยาเคมี	258
5.5.2 ปัจจัยและประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก	261
เอกสารอ้างอิง	262
<b>บทที่ 6 การบำบัดและกำจัดสารอินทรีย์จากตัวกลางสิ่งแวดล้อมด้วยวัสดุนาโน</b>	
6.1 สารอินทรีย์	268
6.2 ลักษณะสมบัติและปฏิกิริยาเคมีพื้นฐานของสารอินทรีย์	272
6.2.1 ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์	272





	หน้า
6.2.2 ปฏิบัติการเคมีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดและกำจัดสารอินทรีย์	281
6.3 การกำจัดสารอินทรีย์ด้วยวัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์	290
6.3.1 กลไกและปฏิกิริยาทางเคมี	290
6.3.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด	306
6.4 การกำจัดสารอินทรีย์และฟีนฟูฟีนที่ปนเปื้อนด้วยเหล็กและเหล็กนาโนประจุศูนย์	309
6.4.1 กลไกและปฏิกิริยาทางเคมี	313
6.4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด	325
เอกสารอ้างอิง	331
<b>บทที่ 7 การปรับปรุงคุณภาพน้ำและการผลิตน้ำสะอาดด้วยวัสดุนาโน</b>	
7.1 การปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคด้วยวัสดุนาโน	342
7.1.1 การกำจัดจุลินทรีย์ในน้ำด้วยวัสดุนาโน	342
7.1.2 การปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยระบบเมมเบรนที่มีวัสดุนาโน	350
7.2 การตรวจวัดคุณภาพน้ำด้วยนาโนเซ็นเซอร์	366
7.2.1 วัสดุนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ	366
7.2.2 วัสดุท่อนาโนคาร์บอนในการเป็นเซ็นเซอร์ตรวจวัดคุณภาพน้ำ	371
เอกสารอ้างอิง	373
<b>บทที่ 8 การบำบัดน้ำเสียด้วยวัสดุนาโนและการออกแบบถังปฏิกรณ์</b>	
8.1 การเลือกกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวัสดุนาโนที่เหมาะสมและข้อควรพิจารณา	382
8.2 การใช้หน่วยบำบัดนาโนในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม	393
8.3 ถังปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	399
8.3.1 แสงและแหล่งกำเนิดแสง	400
8.3.2 รูปแบบของถังปฏิกรณ์และวัสดุที่ใช้	404
8.3.3 ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับแสงอัลตราไวโอเล็ต	407
8.3.4 ถังปฏิกรณ์โฟโตคะตะไลซิสสำหรับแสงจากดวงอาทิตย์	415
8.4 ถังปฏิกรณ์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบเมมเบรนร่วมกับปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิส	422
เอกสารอ้างอิง	430
<b>บทที่ 9 การกำจัดมลพิษทางอากาศด้วยวัสดุนาโน</b>	
9.1 พื้นฐานของปฏิกิริยาโฟโตคะตะไลซิสในการกำจัดมลพิษทางอากาศ	440



	หน้า
9.2 การกำจัดมลพิษทางอากาศภายในอาคาร	445
9.2.1 มลพิษทางอากาศภายในอาคารและกลไกในการกำจัดด้วยวัสดุนาโน	446
9.2.2 ถึงปฏิกรณ์สำหรับการกำจัดมลพิษทางอากาศภายในอาคารโดยใช้วัสดุนาโนและปัจจัยทางวิศวกรรม	454
9.3 การกำจัดมลพิษทางอากาศทั่วไปด้วยวัสดุนาโน	459
9.3.1 มลพิษทางอากาศและกลไกในการกำจัดด้วยวัสดุนาโน	459
9.3.2 ผลิตภัณฑ์นาโนในการกำจัดมลพิษทางอากาศ	469
เอกสารอ้างอิง	474
<b>บทที่ 10 ความปลอดภัยของวัสดุนาโนต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม</b>	
10.1 วัสดุนาโนและผลิตภัณฑ์นาโนในชีวิตประจำวัน	483
10.2 การปลดปล่อยและพฤติกรรมของวัสดุนาโนในสิ่งแวดล้อม	488
10.3 แนวทางการทดสอบความเป็นพิษของวัสดุนาโน	499
10.3.1 การทดสอบการแปรสภาพของวัสดุนาโนในสิ่งแวดล้อม	500
10.3.2 การทดสอบความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนต่อสิ่งมีชีวิต	502
10.3.3 การทดสอบความเป็นอันตรายของวัสดุนาโนต่อสุขภาพ	504
10.4 ผลกระทบของวัสดุนาโนต่อระบบนิเวศวิทยา	508
10.4.1 ผลกระทบของวัสดุนาโนต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ	508
10.4.2 ผลกระทบของวัสดุนาโนต่อจุลินทรีย์และสิ่งมีชีวิตในดิน	510
10.4.3 ผลกระทบของวัสดุนาโนต่อพืช	512
10.5 การได้รับวัสดุนาโนและแนวโน้มของผลกระทบที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์	514
10.6 การประเมินความเสี่ยงในการได้รับวัสดุนาโน	525
10.7 การจัดการและการป้องกันการได้รับวัสดุนาโนจากการทำงาน	530
10.8 ทิศทางของการพัฒนางานวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยีเพื่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต	535
เอกสารอ้างอิง	538

AC	Activated carbon – ถ่านกัมมันต์
AFM	Atomic Force Microscope - กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry – หน่วยงานด้านสารเคมีและเชื้อโรคของประเทศอเมริกา
CB	Conduction band – คอนดักชันแบนด์
CNT	Carbon nanotube – ท่อนาโนคาร์บอน
DNAPL	Dense non-aqueous phase liquid – ของเหลวที่ไม่ละลายน้ำและมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ
EC50	Half-maximal effective concentration - การวัดประสิทธิภาพของสารเคมีจากปริมาณและความเข้มข้นของสารที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพ 50% ระหว่างระดับฐานต่ำสุดคือไม่ได้ใช้สารเคมีเลย (0%) จนถึงระดับอิ่มตัวสูงสุดที่สารเคมีมากที่สุดในระยะเวลายาวนาน
EDS	Energy-dispersive X-ray analysis – การวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน
ICP	Inductively Coupled Plasma
LC50	Median lethal concentration – ความเข้มข้นของสารเคมีที่ทำให้สัตว์ทดลองตายเป็นจำนวน 50% ของจำนวนเริ่มต้น
LD50	Median lethal dose – ปริมาณของสารเคมีที่ทำให้สัตว์ทดลองตายเป็นจำนวน 50% ของจำนวนเริ่มต้น
LNAPL	Light non-aqueous phase liquid – ของเหลวที่ไม่ละลายน้ำและมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ
MWCNT	Multi-walled carbon nanotube – ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health – หน่วยงานด้านอาชีวอนามัยของประเทศสหรัฐอเมริกา
nZVI	Nano zero-valent iron – เหล็กนาโนประจุศูนย์
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development – องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา
pH <sub>pzc</sub>	pH at the point of zero charge – ค่าพีเอชที่ทำให้ประจุเป็น 0
POE	Point of entry – หน่วยผลิตน้ำสะอาดขนาดเล็กประจำบ้าน
POU	Point of use – หน่วยผลิตน้ำสะอาดขนาดเล็กที่ติดตั้งที่จุดจ่ายน้ำ (ก๊อกน้ำ)



---

RfD	Reference Dose – ปริมาณสารเคมีที่มนุษย์สามารถรับเข้าสู่ร่างกายได้ทุกวัน โดยไม่ทำให้เกิดความผิดปกติใดๆ ต่อสุขภาพอนามัย
SEM	Scanning Electron Microscope - กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
SWCNT	Single wall carbon nanotube – ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว
TEM	Transmission Electron Microscope – กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
TiO <sub>2</sub>	Titanium dioxide – ไททาเนียมไดออกไซด์
U.S. EPA	U.S. Environmental Protection Agency – องค์กรพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของประเทศสหรัฐอเมริกา
UV	Ultraviolet – อัลตราไวโอเล็ต
VB	Valence band – วาเลนซ์แบนด์
XAS	X-ray Absorption Spectroscopy – เครื่องมือที่ใช้เทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy – เครื่องมือที่วัดการปลดปล่อยพลังงานแสงอิเล็กตรอนในรูปรังสีเอ็กซ์
XRD	X-ray Diffraction – การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์