

การศึกษาการเตรียมหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้าง

THE STUDY OF THE PRODUCTION OF DETECTOR TUBE  
FOR DETERMINATION OF FREE RESIDUAL CHLORINE

อรุณชัย อุนาสรี  
ARUNCHAI UNASRI

๒๕๓  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมี  
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

การศึกษาการเตรียมหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้าง

THE STUDY OF THE PRODUCTION OF DETECTOR TUBE  
FOR DETERMINATION OF FREE RESIDUAL CHLORINE



อรุณชัย อุณาศรี

ARUNCHAI UNASRI

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

74517

- 2 ต.ค. 2550

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

**THE STUDY OF THE PRODUCTION OF DETECTOR TUBE  
FOR DETERMINATION OF FREE RESIDUAL CHLORINE**

**ARUNCHAI UNASRI**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

**COPYRIGHT 2007**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

-----

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาการเตรียมหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้าง  
The Study of the Production of Detector Tube for Determination  
of Free Residual Chlorine





ชื่อนักศึกษา            นางสาวอรุณฉาย      อุนาศรี

รหัสประจำตัว            46063802

ปริญญา                    วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์      ผศ.คณิตา                    ตั้งคณานุรักษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.อรุณี	คงศักดิ์ไพศาล	
ดร.ชัญชญา	ชนชยานนท์	
ผศ.นงนุช	ศิวะภิญโญยศ	
ผศ.คณิตา	ตั้งคณานุรักษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 4 พฤษภาคม 2550 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 602

  
บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... 18 .....เดือน..... พฤษภาคม..... พ.ศ..... ๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเตรียมหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้าง
นักศึกษา	นางสาวอรุณฉาย อุนาศรี
รหัสนักศึกษา	46063802
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีวิเคราะห์)
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ. คณิตา ตั้งคณานุรักษ์

## บทคัดย่อ

วิธีการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียสำหรับการผลิตน้ำประปา น้ำดื่ม และน้ำในสระว่ายน้ำ ได้กลายเป็นวิธีที่นิยมอย่างกว้างขวางและยอมรับโดยทั่วกัน สารประกอบคลอรีนที่นิยมใช้กันทั่วไปในกระบวนการคลอรีเนชัน คือ แก๊สคลอรีน และสารประกอบไฮโปคลอไรต์ คลอรีนที่เหลือจากกระบวนการคลอรีเนชันอาจจะเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำเกิดสารตกค้าง ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทราบปริมาณคลอไรด์ไอออน กรดไฮโปคลอรัส และไฮโปคลอไรต์ที่เหลืออยู่ในแหล่งน้ำ ซึ่งสารดังกล่าวนี้เรียกว่า คลอรีนอิสระตกค้าง ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเตรียมหลอดตรวจวัดสำหรับตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างที่สามารถตรวจวัดได้ง่ายและทราบผลรวดเร็วโดยไม่ต้องพึ่งพาเครื่องมือที่ราคาแพง หลอดตรวจวัดพัฒนามาจากวิธีออสโตรลิคติน เตรียมโดยบรรจุซิลิกาที่เคลือบด้วยสารออสโตรลิคตินลงในหลอดแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm ยาว 8.0 cm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ยาว 10 – 20 cm ทำการระบุดกล้างหลอดแก้วโดยทดสอบกับสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ จากงานวิจัยพบว่าหลอดตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพและใช้งานได้ดี คือ หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm บรรจุซิลิกา – ออสโตรลิคติน 0.05 % (w/w) ทดสอบโดยการฉีดสารตัวอย่างเข้าหลอดตรวจวัด และสามารถตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระได้ดีในช่วง 0 – 25 ppm การทดสอบความถูกต้องของวิธีโดยประเมินความเที่ยงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ได้ค่าอยู่ในช่วง 1.8 – 11.8 % ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณด้วย Horwitz's equation จะได้ค่า HORRAT น้อยกว่า 2 การทดสอบความแม่นยำด้วยค่าร้อยละการคืนกลับได้ค่าอยู่ในช่วง 93.6 – 99.4 % สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี – วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยใช้วิธี t – test และ F – test

<b>Thesis Title</b>	The Study of the Production of Detector Tube for Determination of Free Residual Chlorine
<b>Student</b>	Miss Arunchai Unasri
<b>Student ID.</b>	46063802
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Chemistry (Analytical Chemistry)
<b>Year</b>	2007
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Kanita Tangkananurak

### ABSTRACT

Disinfection of chlorine (chlorination) in wastewater treatment process of public water supply, drinking water and swimming pool water had become so wide and generally accepted. The most common chlorine compounds used in chlorination are chlorine gas ( $\text{Cl}_2$ ) and hypochlorite compounds such as calcium hypochlorite ( $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ) and sodium hypochlorite ( $\text{NaOCl}$ ). The excess chlorine from chlorination also reacted with humic substances, present in most public water supply, forming halogenated products which were human carcinogens. Therefore, we had to know the quantity of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HOCl}$  and  $\text{OCl}^-$  that are present in water which is called the free residual chlorine. This research was aimed to study the preparation of detector tube for simple and rapid quantification of testing free residual chlorine. The detector tube was applied and developed from orthotolidine method and prepared by packing silica–o–tolidine into a glass tube (1.0 mm.i.d., 8 cm length and 2.6 mm.i.d., 10 – 20 cm length) and indicated scale by test with calcium hypochlorite standard solution. From experimental results, the detector tube size 2.6 mm.i.d. x 10 – 20 cm length was packed with 0.05 % (w/w) silica–o–tolidine and gave the good efficiency. It can detect free residual chlorine with concentration range 0–25 ppm , %RSD of 1.8 – 11.8 %, 93.6 – 99.4% recovery and HORRAT value above 2. For comparison of measured results from detector tube with UV – Visible spectrophotometry were not significantly different at the 95 % confidence level by t–test and F–test.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ. คณิดา ตั้งคณาบุรุษย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ผศ. นงนุช ศิวภิญโญยศ และ ดร. ชัญชนา ธนชยานนท์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากอาจารย์ทั้งสี่ท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณนายชัยยะเดช ศรีสุวรรณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อรุณฉาย อุนาศรี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>8</b>
2.1 ซิลิกา.....	8
2.1.1 ชนิดของซิลิกา.....	8
2.1.2 การเกิดพอลิเมอร์ไรซัน (Polymerization) ของซิลิกา.....	11
2.2 ออโรโทลิซีน.....	12
2.3 คลอรีน (Chlorine:Cl <sub>2</sub> ) และคลอรีนอิสระตกค้าง (Free residual chlorine).....	14
2.3.1 สมบัติและลักษณะของคลอรีน.....	14
2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเติมคลอรีนในน้ำ.....	17
2.3.3 การเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนกับแอมโมเนีย (Ammonia : NH <sub>3</sub> ).....	20
2.3.4 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของคลอรีน.....	21
2.3.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนอิสระตกค้าง.....	22
2.3.6 Superchlorination, คลอรีนอิสระตกค้างหรือ Break-Point Chlorination.....	23
2.3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ.....	23

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.8 วิธีการวิเคราะห์หาคลอรินอิสระ.....	25
2.3.9 ข้อดีและข้อเสียของคลอรีน.....	27
2.3.10มาตรฐานทางเคมีของน้ำ.....	29
2.4 หลอดตรวจวัด (Detector tube).....	34
2.4.1 ชนิดของหลอดตรวจวัด.....	35
2.4.2 ลักษณะของหลอดตรวจวัด.....	41
2.4.3 การใช้งานหลอดตรวจวัด .....	42
2.4.4 วิธีการปรับเทียบหลอดตรวจวัด (Calibration gas generation method).....	53
2.4.5 การทำประกันคุณภาพ (Quality assurance) หลอดตรวจวัด.....	54
2.4.6 การวิเคราะห์และแปรข้อมูล.....	55
2.4.7 ลักษณะของความแม่นยำที่ใช้ในหลอดตรวจวัด.....	58
2.4.8 ปัจจัยที่มีผลต่อความผิดพลาดของการตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัด.....	58
2.4.9 ข้อควรระวังในการใช้หลอดตรวจวัด.....	62
2.4.10ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแก๊สด้วยหลอดตรวจวัด.....	62
2.4.11การเก็บรักษาหลอดตรวจวัด.....	62
2.4.12การกำจัดหลอดตรวจวัด.....	62
2.4.13การประยุกต์ใช้งานหลอดตรวจวัด.....	62
2.4.14ข้อดีของหลอดตรวจวัด.....	63
2.5 ทฤษฎีโครมาโทกราฟีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	63
2.5.1 หลักการของโครมาโทกราฟี.....	63
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการแยก.....	66
2.5.3 Partition ratio (Partition Coefficient, K).....	70
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	71

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	75
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	75
3.1.1 สารเคมี.....	75
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	75
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	77
3.3 วิธีวิจัย.....	79
3.3.1 การเตรียมสาร.....	79
3.3.2 ศึกษาการเตรียมซิลิกา – ออโซโทลิดีน (Silica–o–tolidine).....	82
3.3.3 การเตรียมหลอดตรวจวัด.....	83
3.3.3.1 การบรรจุซิลิกา – ออโซโทลิดีนลงในหลอดแก้วปลายปิดแบบต่างๆ.....	83
3.3.3.2 ศึกษาร้อยละการเคลือบออโซโทลิดีนที่เหมาะสม.....	84
3.3.3.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัด.....	85
3.3.3.4 ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัด.....	86
3.3.3.5 ศึกษาการระบุสเกลข้างหลอดตรวจวัดเพื่อระบุสเกลตามความเข้มข้น... ..	87
3.3.3.6 การเตรียมหลอดตรวจวัดคลอรีนอิสระเพื่อใช้งานจริง.....	87
3.3.4 การทดสอบความถูกต้องของวิธี (validation method) ของหลอดตรวจวัด.....	87
3.3.4.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานคลอรีนอิสระ.....	87
3.3.4.2 การศึกษาความเที่ยงของหลอดตรวจวัด.....	87
3.3.4.3 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample.....	87
3.3.4.4 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่าง.....	88
3.4 สถานที่ทำการวิจัย.....	88
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	89
4.1 ผลการวิจัย.....	89
4.1.1 ศึกษาการเตรียมอนุภาคซิลิกา.....	89

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมได้จากเกลบข้าว.....	89
1. วิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลิกาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope...	89
2. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค light scattering analysis....	91
3. วิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเครื่อง Autosorb.....	92
4. วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent.....	95
5. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis.....	95
6. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transforms infrared Spectrometry .....	96
7. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนในซิลิกาด้วยเทคนิค ICP-MS.....	97
4.1.2 ศึกษาการเตรียมซิลิกา – ออโรโทลิดีน (Silica – o – tolidine ) .....	99
4.1.2.1 วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน.....	99
1. วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope .....	99
2. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค light scattering analysis.....	99
3. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis.....	100
4. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transforms infrared Spectrometry..	102
4.1.3 ศึกษาการเตรียมหลอดวัด.....	103
4.1.3.1 ศึกษาอัตราการเคลือบออโรโทลิดีนที่เหมาะสม.....	103
4.1.3.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัด.....	108
4.1.3.3 ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัด.....	111
4.1.3.4 ศึกษาการระบุสเกลข้างหลอดตรวจวัดเพื่อระบุสเกลตามความเข้มข้น..	113
4.1.4 การทดสอบความถูกต้องของวิธีของหลอดตรวจวัด.....	119
4.1.4.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานคลอรีนอิสระ.....	119
4.1.4.2 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample.....	123
4.1.4.3 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่าง.....	128

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	130
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	130
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	131
เอกสารอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก.....	143
ภาคผนวก ก. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของออโรโทลิตินและซิติกา-ออโรโทลิติน ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis.....	144
ภาคผนวก ข. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซิติกาและซิติกา – ออโรโทลิติน ด้วยเทคนิค light scattering analysis.....	146
ภาคผนวก ค. วิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของอนุภาคซิติกา ที่เตรียมจากแคลบข้าวด้วยเครื่องAutosorb.....	149
ภาคผนวก ง. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของออโรโทลิตินด้วยเทคนิค Fourier transforms infrared Spectrometry.....	151
ภาคผนวก จ. เปรียบเทียบซิติกาที่เตรียมจากแคลบข้าวกับซิติกาในทางการค้า.....	153
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษาประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัด.....	158
ภาคผนวก ช. วิธีการคำนวณผลการทดลองทางสถิติ.....	197
ประวัติผู้เขียน.....	203

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ระดับความรุนแรงของแก๊สคลอรีนในปริมาณต่างๆ..... 29
2.2	มาตรฐานคุณภาพน้ำของน้ำในสระว่ายน้ำ..... 29
2.3	มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (ตามข้อแนะนำขององค์การ อนามัยโลก ปี 2536)..... 30
2.4	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... 32
2.5	การตรวจวัด 1,1,1-Trichloroethane ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน..... 59
2.6	การตรวจวัด Tetrachloroethylene ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ กัน..... 60
3.1	อัตราส่วนปริมาณซิลิกา สารละลายอโซโทลิคีน และเอทานอล ด้วยร้อยละ การเคลือบ 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, และ 5.00 % (w/w)..... 82
4.1	เปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากเกลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้า..... 92
4.2	เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของอนุภาคซิลิกาที่ เตรียมจากเกลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้า ..... 95
4.3	เปอร์เซ็นต์ของซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากเกลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent.....95
4.4	ปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนในอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากเกลบข้าว วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-MS เปรียบเทียบกับซิลิกาในทางการค้า..... 98
4.5	เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคซิลิกา และซิลิกา – อโซโทลิคีนร้อยละการเคลือบ 0.01 % (w/w) โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคด้วยเทคนิค light scattering analysis..... 100
4.6	ผลร้อยละโดยน้ำหนักที่สูญหายและ % Carbon loading ของซิลิกา-อโซโทลิคีนใน ช่วงอุณหภูมิ 150.0 – 800.0 °C โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA..... 102
4.7	การศึกษาร้อยละการเคลือบอโซโทลิคีนที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัด โดยทดสอบกับ คลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm.....106
4.8	การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัดของหลอดตรวจวัด โดยทดสอบกับ คลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm..... 110
4.9	การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – อโซโทลิคีน 0.05 % (w/w)..... 112

# สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4.10	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) เมื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm.....	114
4.11	การเปรียบเทียบระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของหลอดตรวจวัดจากการทดลอง และการคำนวณด้วยสมการ $y = 0.499x$ .....	116
4.12	แสดง $y$ -residual ของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-25 ppm..	117
4.13	ช่วงสเกลของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm .....	118
4.14	ช่วงความเชื่อมั่น t-test และ F-test ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียม ขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี....	120
4.15	แสดง Horwitz's equation และ HORRAT เพื่อเปรียบเทียบ %RSD <sub>r</sub> ของการตรวจวัด ปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัด.....	121
4.16	แสดง $y$ - residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	122
4.17	ช่วงความเชื่อมั่น t-test และ F-test ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำ ตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	124
4.18	แสดง Horwitz's equation และ HORRAT เพื่อเปรียบเทียบ %RSD <sub>r</sub> ของการตรวจวัด ปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัด.....	125
4.19	แสดง $y$ - residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	126
4.20	ร้อยละการคืนกลับของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างจากสระ ว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้หลอดตรวจวัด....	127
4.21	ช่วงความเชื่อมั่น t-test และ F-test ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำตัว อย่างโดยใช้หลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	129
4.22	Horwitz's equation และ HORRAT เพื่อเปรียบเทียบ %RSD <sub>r</sub> ของการตรวจวัดปริมาณ คลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัด.....	129
ข1	การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว.....	147

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข2	การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิคีน ด้วยร้อยละการเคลือบ 0.10 % (w/w)..... 148
1จ	เปรียบเทียบซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้าชนิดต่างๆ.....154
ฉ1	การศึกษาร้อยละการเคลือบออโรโทลิคีนที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัด โดยทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm..... 159
ฉ2	การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิคีน 0.10 % (w/w)ในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ 50 ppm ทดสอบโดยการจุ่ม..... 168
ฉ3	การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิคีน 0.05 % (w/w)ในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ 50 ppm ทดสอบโดยการฉีด..... 170
ฉ4	การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิคีน 0.05 % (w/w)..... 172
ฉ5	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิคีน 0.05 % (w/w) เมื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm..... 173
ฉ6	การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี..... 186
ฉ7	การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างด้วยหลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี..... 190
ฉ8	การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง..... 194
ฉ9	การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสวนพระนคร.....195
ฉ10	การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคลองหก.....196

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การจัดเรียงตัวกันแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกา..... 8
2.2	ลักษณะของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ทำเฟสที่อยู่กับที่ของHPLC..... 9
2.3	โครงสร้างและการเกิดพันธะภายใน โครงร่างตาข่ายของซิลิกาโดยที่ผิวจะมี หมู่ไฮดรอกซีไฮดรอกซิล..... 9
2.4	หมู่ไฮดรอกซีไฮดรอกซิลบนผิวของซิลิกาแบบต่างๆ.....10
2.5	ซิลิกาในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจัดเรียงกันแบบเตตระฮีดรอล..... 10
2.6	การเกิดการเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบร่างตาข่ายของซิลิกาแบบผลึก(ก)และแบบไม่เป็นผลึก(ข)..11
2.7	สูตรโครงสร้างของออร์โทโทลิคีน..... 12
2.8	ปฏิกิริยาของคลอรีนเมื่อเติมลงในน้ำจะเกิดเป็นคลอรีนในแบบต่างๆ กัน..... 19
2.9	ผลของ pH และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระตกค้าง..... 19
2.10	ชนิดของหลอดตรวจวัดแบบต่างๆ..... 35
2.11	Standard Detector Tubes แบบต่างๆ..... 36
2.12	หลอดตรวจวัดแบบ single tube (ก) และ twin tube (ข)..... 37
2.13	Dosi-Tubes (ก) และ Dosi-tube ที่ถูกใส่ใน Dosi-tube holder (ข)..... 37
2.14	Polytec Tubes ที่ต่อเข้ากับ PYROTEC Pyrolyzer และปั๊มสุญญากาศ..... 38
2.15	Breathing Air Tubes ซึ่งต่อเข้ากับถังแก๊สเพื่อวัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในถังแก๊ส..... 39
2.16	วิธีการใช้ Breathing Air Tubes..... 40
2.17	ส่วนประกอบของหลอดตรวจวัด..... 42
2.18	อุปกรณ์และวิธีการใช้งานหลอดตรวจวัด..... 42
2.19	หลอดตรวจวัดก่อนใช้งาน (ก) เปรียบเทียบกับหลังใช้งาน (ข)..... 43
2.20	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Vacuum method..... 45
2.21	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Injection method..... 46

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Motor-driven pump method..... 47
2.23	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Diffusion method..... 48
2.24	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Boring method..... 49
2.25	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Reagent adding method..... 51
2.26	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Vapor-liquid equilibrium method..... 52
2.27	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Capillary method..... 53
2.28	การอ่านค่าความเข้มข้นของสารด้วยวิธีการอ่านจากสเกลของหลอด โดยตรง (ก) และอ่าน โดยเปรียบเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร (ข) ..... 56
2.29	การเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดในลักษณะต่างๆ ..... 57
2.30	การแยกสาร A ออกจาก สาร B โดยอาศัยหลักการทางโครมาโทกราฟี..... 64
2.31	การแพร่กระจายของโมเลกุลของสารไปในคอลัมน์..... 65
2.32	อัตราการกระจายตัวหรืออัตราการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของสารชนิดเดียวกัน ซึ่งเกิดจากกระบวนการทางกายภาพ..... 66
2.33	การเกิด Eddy diffusion ในคอลัมน์..... 66
2.34	การเกิด Mobile Phase Mass Transfer..... 67
2.35	การเกิด Stagnant mobile phase mass transfer..... 68
2.36	การเกิด Stationary phase mass transfer..... 69
2.37	การเกิด Longitudinal diffusion..... 70
2.38	สาร A และ B ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่ต่างกันจึงทำให้ถูกแยกออกจากกันได้..... 71
3.1	วิธีการบรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีนลงในหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด (ค)..... 84
3.2	วิธีการใช้หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด(ค)..... 85
4.1	ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว โดยผ่าน ตะแกรงร่อนขนาด 35 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า..... 89
4.2	ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว โดยผ่าน ตะแกรงร่อนขนาด 70 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า..... 89

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว โดยผ่าน ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า..... 90
4.4	ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว โดยผ่าน ตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า..... 90
4.5	การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว..... 91
4.6	ไอโซโทมที่ได้จากการแอดซอร์บและดีซอร์บแก๊สไนโตรเจนของ อนุภาคซิลิกาที่เตรียมได้จากแกลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb..... 93
4.7	BJH desorption DV (log d) polt ของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว ซึ่งวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง Autosorb..... 94
4.8	กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากแกลบข้าวโดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis..... 96
4.9	สเปกตรัม FT-IR ของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว..... 97
4.10	ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.01 % (w/w) โดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช กำลังขยาย 50 และ 1500 เท่า..... 99
4.11	การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.01 % (w/w) โดยวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคด้วยเทคนิค light scattering analysis..... 100
4.12	กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกา – ออโรโทลิดีนร้อยละของ การเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis..... 101
4.13	สเปกตรัม FT-IR ของซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.10 % (w/w)..... 103
4.14	ซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.01 - 5.00 % (w/w)..... 104
4.15	ลักษณะของหลอดตรวจวัดที่ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีฉีด (ค)..... 105
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีนกับระยะทางที่เกิดการ เปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัด โดยทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm..... 108

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ลักษณะของหลอดตรวจวัดที่ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในเวลาการตรวจวัดต่างๆ ทั้ง 3 แบบคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด (ค).....	109
4.18 ลักษณะของหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในสภาวะที่ปรับ pH (1.79) และ ไม่ปรับ pH (10.05) โดยทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm.....	111
4.19 ลักษณะการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) เมื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm.....	113
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุ ซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ ความเข้มข้น 0-100 ppm.....	115
4.21 กราฟแสดงช่วงของความเป็นเส้นตรงของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดปริมาณ คลอรีนอิสระความเข้มข้น 0 – 25 ppm.....	116
4.22 กราฟแสดง y-residual ของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ ความเข้มข้น 0 – 25 ppm.....	118
4.23 ลักษณะของหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ.....	119
4.24 กราฟแสดงช่วงของความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัด (y) กับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x).....	122
4.25 กราฟแสดง y – residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	123
4.26 กราฟแสดงช่วงของความเป็นเส้นตรงของหลอดตรวจวัดในตรวจวัดปริมาณคลอรีน อิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัด (y) กับวิธีมาตรฐาน ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x).....	126
4.27 กราฟแสดง y – residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงใน น้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี.....	127
ก1 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของออโซโทลิคีน โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis.....	145

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก2	กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกา-ออโรโทลิคีนร้อยละการเคลือบ 4 % โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis.....145
ค1	Bet plot ของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากเกลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องด้วยเครื่อง Autosorb..... 150
ง1	สเปกตรัมFT-IR ของออโรโทลิคีน..... 152

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

หากจะกล่าวว่าคลอรีนเป็นหนึ่งในสารเคมีที่จำเป็นต่อชีวิตผู้คนในปัจจุบัน ก็คงจะไม่เกินความเป็นจริงนัก เพราะในวันหนึ่ง ๆ นั้นมนุษย์มีโอกาสดูแลตัวเองที่ต้องสัมผัสกับคลอรีนไม่ทางใดก็ทางหนึ่ง เช่น ในน้ำประปาหรือสระว่ายน้ำ แม้กระทั่งในน้ำยาฟอกผ้าขาวที่อาจมีส่วนผสมของคลอรีนอยู่ด้วย [1]

คลอรีน คือ สารเคมีชนิดหนึ่ง เมื่ออยู่ในสถานะแก๊สจะมีสีเหลืองเขียว แต่เมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะมีสีน้ำตาลเหลือง มีคุณสมบัติที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นๆ เนื่องจากเป็นธาตุที่อยู่ในหมู่ของธาตุฮาโลเจน คลอรีนที่ใช้สำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำมี 2 ชนิด คือชนิดผงและชนิดแก๊ส ซึ่งสารประกอบคลอรีนที่ใช้อยู่ในรูปของสารประกอบแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ โดยจะเป็นผงสีขาวมีสูตรทางเคมี  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  หรืออาจอยู่ในรูปของคลอโรกซ์ซึ่งเป็นน้ำยาฟอกสีหรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์มีสูตรเป็น  $\text{NaOCl}$  [2]

คลอรีนเป็นสารออกซิไดซ์สามารถทำปฏิกิริยากับสารรีดิวซ์ทุกชนิดที่อยู่ในน้ำมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำค่อนข้างสูง นอกจากใช้กำจัดเชื้อจุลินทรีย์และพยาธิต่างๆ แล้วยังเป็นสารที่ช่วยกำจัดแพลงก์ตอนในน้ำและช่วยในการตกตะกอนอินทรีย์วัตถุรวมทั้งแพลงก์ตอนต่างๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำ คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งคือ ช่วยในการออกซิไดซ์พวกโลหะและสารพิษต่างๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทำให้พิษลดน้อยลงแต่อย่างไรก็ตามคลอรีนจะทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ด้วย จึงจำเป็นต้องเติมคลอรีนให้มีปริมาณพอเพียงที่จะต้องใช้คลอรีนตกค้างอยู่ด้วย คลอรีนตกค้างอาจจะอยู่ในรูปของคลอรีนอิสระ (Free residual chlorine) ซึ่งมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคได้ดี หรืออยู่ในรูปของคลอรีนรวมตัวหรือคลอรีนอิสระคงเหลือ (Combined residual chlorine) ซึ่งมีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อโรคน้อย

ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำคลอรีนมาเป็นสารเคมีที่ใช้ในการทำลายเชื้อโรค ในกระบวนการบำบัดน้ำ เช่น น้ำประปา น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำในสระว่ายน้ำ การล้างบ่อ โดยเฉพาะการผลิตอาหารในเชิงอุตสาหกรรมจะใช้คลอรีนฆ่าทำลายเชื้อโรคในบริเวณพื้นที่ต่างๆ ทั้งบริเวณพื้นผิวโต๊ะทำงาน บริเวณพื้น รวมทั้งการล้างวัสดุอุปกรณ์ หรือแช่ล้างอาหารดิบ เพื่อฆ่าเชื้อโรค ซึ่งสารประกอบคลอรีนที่นิยมใช้กันคือ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ สำหรับความเข้มข้นของคลอรีนและระยะเวลาในการใช้ขึ้นกับประเภทของการใช้ เช่น การแช่ล้างผักจะใช้น้ำยาคลอรีนความเข้มข้น 50 ppm แช่นาน 30 นาที ถ้าล้างภาชนะอุปกรณ์จะใช้น้ำยาคลอรีนเข้มข้น 100 ppm นาน 2 นาที เป็นต้น

และนอกจากนี้ยังใช้คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อในโรงเพาะฟัก โดยใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่จะนำมาเพาะฟักลูกกุ้งและใช้ทำความสะอาดวัสดุอุปกรณ์ และทำความสะอาดบ่อในโรงเพาะฟัก แต่การใช้คลอรีนจะต้องใช้อย่างระมัดระวัง เพราะหากยังมีคลอรีนหลงเหลืออยู่ในน้ำ โอกาสที่จะเป็นอันตรายต่อกุ้งมีมาก (การใช้คลอรีนจะต้องเตรียมน้ำทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง จนกระทั่งคลอรีนสลายตัวหมดจึงจะสามารถนำน้ำนั้นมาใช้ได้) และคลอรีนยังก่อให้เกิดอาการระคายเคืองสูงจึงอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้ [3]

คลอรีนเป็นสารฆ่าเชื้อที่มีความสามารถในการออกซิไดส์ซิง (Oxidizing) สูง จึงมีการนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือการทำน้ำประปาเพราะมีราคาถูกกว่าการบำบัดด้วยวิธีโอโซนและอัลตราไวโอเล็ต (UV) สำหรับขั้นตอนในการฆ่าเชื้อโรคจะเติมแก๊สคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีน เช่น ไฮโปคลอไรต์ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้คลอรีเนชัน [4] กลไกทางเคมีเมื่อเติมคลอรีนลงไปในน้ำคือเมื่อคลอรีนสัมผัสกับน้ำก็จะปล่อยกรดไฮโปคลอไรต์ (ซึ่งเรียกว่าคลอรีนอิสระ) ออกมา โดยกรดไฮโปคลอไรต์นี้เองที่ทำหน้าที่เป็นสารฆ่าเชื้อโรค เช่น เชื้ออหิวาต์ ไทฟอยด์ และนอกจากนี้กรดไฮโปคลอไรต์ยังมีประโยชน์สำหรับลดบีโอดีของน้ำ ทำลายสารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดรสและกลิ่นในน้ำ ควบคุมสาหร่ายในเครื่องกำจัดน้ำเสีย ช่วยในการตกตะกอน และออกซิไดส์สารพวกเหล็ก แมงกานีส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดสีและกลิ่นในน้ำ

คลอรีนอิสระเป็นสารที่ใช้ในการกำจัดเชื้อโรคในน้ำ ซึ่งการผลิตน้ำประปาในอเมริกาส่วนใหญ่ประมาณ 92 % นิยมใช้ คลอรีนอิสระในการฆ่าเชื้อโรค ในน้ำประปาทั่วไปจะมีค่า คลอรีนอิสระอยู่ในช่วง 0.2 – 4 ppm เมื่อน้ำประปาสัมผัสกับอากาศ คลอรีนอิสระจะระเหยอย่างรวดเร็ว แต่ภายในท่อส่งน้ำคลอรีนอิสระจะทำให้น้ำประปาปราศจากจุลินทรีย์ ภายหลังจากที่คลอรีนอิสระจับกับเชื้อโรคแล้วทำให้กลายเป็นโมโนคลอรามิน (Monochloramine) ซึ่งเป็นต้นเหตุของ “กลิ่นคลอรีน” ที่เรามักได้กลิ่นเมื่อว่ายน้ำในสระ ในโรงผลิตน้ำประปาบางส่วนจะฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนอิสระ แล้วตามด้วยแอมโมเนียมซัลเฟตเพื่อใช้ลดปริมาณการก่อตัวของ Trihalomethane (THM's) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง [5]

ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาของประเทศไทยนั้นได้ใช้แก๊สคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ปริมาณการใช้จะอยู่ในระหว่าง 2.5 – 3.0 mg/L ขึ้นอยู่กับฤดูกาลและคุณภาพของน้ำดิบ โดยน้ำร้อนจะมีการเพิ่มปริมาณการใช้สูงกว่าปกติเล็กน้อยเพื่อป้องกันการเกิดโรคระบาดในระบบทางเดินอาหาร เช่น การเกิดอหิวาตกโรค เป็นต้น ปริมาณของคลอรีนที่ใส่ลงไปนี้น้ำประปานี้จะคงเหลืออยู่ในระบบเส้นท่อจ่ายน้ำไม่น้อยกว่า 0.2 mg/L ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ขององค์การอนามัยโลก การกำจัดกลิ่นคลอรีนในน้ำประปานี้สามารถทำได้ง่ายๆ คือ รอน้ำประปาใส่ในภาชนะที่สะอาด และอย่าให้สิ่งสกปรกตกลงไป ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20-30 นาที คลอรีนก็จะระเหยไปเอง [1]

ในกรณีของสระว่ายน้ำ โดยทั่วไปจะมีการใส่คลอรีนเพื่อเป็นการบำบัดน้ำในสระให้สะอาด คลอรีนสามารถควบคุมการเกิดสาหร่ายและแบคทีเรียได้ [6]

ประเภทของคลอรีนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสระว่ายน้ำทั่วไปนอกจากแก๊สคลอรีนแล้ว ยังมี โซเดียมไฮโปคลอไรต์, แคลเซียมไฮโปคลอไรต์, ลิเทียมไฮโปคลอไรต์และคลอรีนเตตระไฮโซไซยานูเรต อีกด้วย กลไกในการเกิดปฏิกิริยาของสารเหล่านี้จะเกิดกรดไฮโปคลอรัสเช่นเดียวกับแก๊สคลอรีน ยกเว้นคลอรีนเตตระไฮโซไซยานูเรตเมื่อสัมผัสกับน้ำจะให้กรดไซยานูริก ซึ่งจะเป็นตัวที่ปรับสภาพน้ำ เพื่อลดการสูญเสียคลอรีนอันเนื่องมาจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ปริมาณของคลอรีนอิสระในสระว่ายน้ำควรอยู่ที่ประมาณ 1-3 mg/L (ตามมาตราฐาน National Spa and Pool Institute) [7, 8] ดังนั้นหลังจากที่ว่ายน้ำในสระว่ายน้ำ แล้วจึงควรอาบน้ำและสระผมเพื่อล้างคลอรีนออกทันที เพราะถ้าไม่ทำเช่นนี้จะมีผลต่อสภาพของผิวและเส้นผม โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นผมหากไม่สระผมภายหลังการว่ายน้ำบ่อย ๆ คลอรีนอาจจะไปทำลายโปรตีนที่เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเส้นผม ทำให้ผมขาดความชุ่มชื้น แห้ง และใรน้ำหนักได้ [9]

นอกจากการใช้คลอรีนเพื่อประโยชน์ในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำแล้วยังมีการใช้ประโยชน์เพื่อเป็น สารฟอกขาวได้อีกด้วย โดยจะใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์เป็นสารออกฤทธิ์ในน้ำยาฟอกผ้าขาว ซึ่งเมื่อ เทน้ำยาฟอกผ้าขาวผสมลงในน้ำก็จะเกิดกรดไฮโปคลอรัสเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาของแก๊สคลอรีน ในน้ำ แต่ข้อควรระวังสำหรับการใช้สารฟอกขาวที่ทำมาจากคลอรีนเหล่านี้คือ อาจเกิดผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตและการแตกตัวของสารฟอกขาวได้เป็นสารออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine) ซึ่งมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นอาจหลีกเลี่ยงอันตรายดังกล่าวโดยใช้สารฟอกขาวที่ทำจากไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์แทน โดยเฉพาะไม่ควรใช้กับผ้าอ้อมและเสื้อผ้าเด็ก แต่ถ้าจำเป็นให้ใช้น้ำมะนาวผสมเกลือและ น้ำในการซักตากแดดแทนจะดีที่สุด [1]

จากการวิจัยพบว่า ถ้าใส่คลอรีนในปริมาณที่เหมาะสม คือใส่ประมาณ 2 ppm จะสามารถฆ่า เชื้อโรคในน้ำดื่มที่เราก็กักเก็บในภาชนะได้พอดี และไม่ทำอันตรายต่อผู้ที่นำน้ำนั้น ไปดื่มด้วย แต่จะ พบว่า น้ำยังคงมีกลิ่นฉุนของคลอรีน ถ้าไม่ชอบกลิ่นนี้ก็สามารถทิ้งไว้ค้างให้ระเหยไปก่อนนำมาใช้และ ดื่มได้ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 คืน

ถ้ามีปริมาณคลอรีนอยู่เกินกว่า 4 mg/L จะเป็นอันตรายต่อปลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับลูกปลา สารคลอรีนนี้จะไปรบกวนระบบการแลกเปลี่ยนแร่ธาตุและออกซิเจนที่เหงือกของปลา ทำให้ปลา มีอาการช็อก คิ้นทุรนทุราย และตายในที่สุดโดยทั่วไปน้ำประปามีปริมาณคลอรีน 1 - 2 mg/L ดังนั้น ก่อนที่จะนำมาใช้เลี้ยงปลาจึงควรตั้งทิ้งไว้กลางแจ้งนานประมาณ 2 วัน และใส่แอร์บัมด้วย เพื่อให้ คลอรีนระเหยออกไปเสียก่อนจะนำมาใช้ถ้ามีความจำเป็นต้องรับใช้น้ำที่มีคลอรีน อาจใช้โซเดียมไทโอ

ซัลเฟต ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึก สี ๆ ใส่งในน้ำในอัตรา 3-5 g ต่อน้ำ 1,000 L ก่อนก็จะช่วยกำจัดคลอรีนได้ [10]

คลอรีนสามารถเข้าสู่ร่างกายเราได้ทั้งทางการหายใจ สัมผัสทางผิวหนังหรือเข้าตา และระบบทางเดินอาหาร อันตรายอย่างเฉียบพลันเมื่อได้รับคลอรีนโดยทางการหายใจเข้าไป คือ จะเกิดระคายเคืองต่อจมูก คอ และระบบหายใจส่วนบน คลอรีนในอากาศปริมาณ 0.2 ppm จะทำให้คันจมูก แต่ถ้าปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 1-1.3 ppm จะทำให้คอแห้ง ไอ หายใจลำบาก ปวดศีรษะ หากมากกว่า 30 ppm ในอากาศ จะเกิดอาการเจ็บหน้าอกและอาเจียน และที่อันตรายมากที่สุดคือจะทำให้เกิดหลอดลมอักเสบ ปอดบวมและเสียชีวิตได้เมื่อได้รับมากกว่า 100 ppm

ในกรณีที่เข้าตาจะเกิดอาการเคืองตาอย่างรุนแรง แก๊สคลอรีนจะทำให้ปวดแสบปวดร้อน และน้ำตาไหล คลอรีนเหลวจะทำให้เนื้อเยื่อตาไหม้และอาจทำให้ตาบอดได้ ถ้าถูกผิวหนังจะเกิดอาการระคายเคือง แก๊สคลอรีนที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ผิวหนังไหม้และเป็นตุ่มแดง ถ้าคลอรีนเหลวถูกผิวหนังจะทำให้ไหม้และเนื้อเยื่อตายได้ ส่วนในกรณีที่รับประทานคลอรีนเข้าไป คลอรีนเหลวจะทำให้ระบบทางเดินอาหารที่สัมผัสกับคลอรีนเจ็บปวดไหม้ จะเกิดอาการกระหายน้ำ ลำตัวเป็นตะคริวและคลื่นไส้ [1]

ดังที่กล่าวในตอนต้นว่ามนุษย์มีโอกาสได้สัมผัสกับคลอรีนเน่าๆ เพราะคลอรีนเป็นส่วนที่ใช้ในกระบวนการทำน้ำประปา สระว่ายน้ำ หรือการซักผ้า และจะเห็นว่าคลอรีนมีโทษอย่างมากมาย แต่ถ้าใช้คลอรีนในปริมาณที่เหมาะสมก็จะไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต

อย่างไรก็ตามแม้ว่ากระบวนการคลอรีเนชันจะมีผลดี แต่ก็ยังทำให้เกิดผลเสียได้ด้วยเหมือนกัน โดยจะทำให้เกิดสารพวกฟีนอลและสารอินทรีย์อื่นๆ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้เกิดจากการเติมคลอรีนลงในน้ำที่มีสารประกอบเอมีนทำให้คลอรีนไปรวมกับสารประกอบเหล่านี้แล้วกลายเป็นสารที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบางชนิด นอกจากนี้ยังทำให้เกิดสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ในน้ำด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจวัดปริมาณของคลอรีนอิสระในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้มีค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ก่อนที่จะนำมาใช้หรือก่อนที่จะปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลอง

การตรวจวัดหาปริมาณของคลอรีนอิสระสามารถทำได้หลายวิธี เช่น Starch iodine method (หรือ Iodometric method), Orthotolidine method, Orthotolidine – Arsenite method, Stabilized Neutral Orthotolidine (SNORT) method, Amperometric titration, DPD Ferrous titrimetric method, DPD Colorimetric method และ Syringaldazine (FACTS) method ซึ่งวิธีการวิเคราะห์เหล่านี้จะต้องมีการเก็บตัวอย่างน้ำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์ก่อนข้างยุ่งยาก นอกจากนี้ยังเสียค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สูง เพราะต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีราคาแพง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาวิธีตรวจวัดคลอรีนอิสระขึ้นมาใหม่ โดยได้ศึกษาและผลิตหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ จากการนำเอาออสโมทิลิตินมาเคลือบบนผิวของซีลิกาเพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดใหม่ๆ และพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ให้มีความทันสมัยมากขึ้น ซึ่งหลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นนี้จะมีขนาดเล็ก สามารถพกพาไปตรวจวัดได้ที่แหล่งน้ำได้โดยไม่ต้องยุ่งยากในการเก็บน้ำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ทำให้ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เตรียมซีลิกาขึ้นเองจากแคลบข้าว เนื่องจากแคลบข้าวมีปริมาณซีลิกาถึง 15 % และนอกจากนี้แคลบข้าวยังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร สามารถหาได้ง่าย เพราะในประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักอยู่แล้ว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างที่มีขนาดเล็ก ใช้งานง่ายสะดวก รวดเร็ว และให้ผลน่าเชื่อถือได้

1.2.2 เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้าง และลดการนำเข้าของหลอดตรวจวัดจากต่างประเทศ

1.2.3 เพื่อใช้เทคโนโลยีในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดใหม่ๆ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 เตรียมซิติกาจากแอลบข้าวด้วยวิธีการใช้เครื่องพ่นแห้ง (Spray Dryer) และวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิติกาที่เตรียมขึ้น

1.3.2 ศึกษาการเคลือบสารเคมี (อโซโทลิติน) บนผิวซิติกา และวิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิติกาที่ผ่านการเคลือบแล้ว

1.3.3 บรรจุซิติกาที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคมีลงในหลอดแก้วปลายปิด

1.3.4 นำหลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นมาทดสอบประสิทธิภาพด้วยสารละลายมาตรฐาน แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ เพื่อระบุสเกลตามความเข้มข้น

1.3.5 นำหลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นมาตรวจสอบความถูกต้องของวิธีพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน

1.3.6 นำหลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นมาทดสอบกับน้ำตัวอย่างพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างที่มีขนาดเล็ก ใช้งานง่าย สะดวก รวดเร็ว และให้ผลน่าเชื่อถือได้

1.4.2 สามารถลดค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้าง และลดการนำเข้าของหลอดตรวจวัดจากต่างประเทศ และสามารถลดการเสียเปรียบดุลการค้าจากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังผลิตขายต่างประเทศได้ด้วย

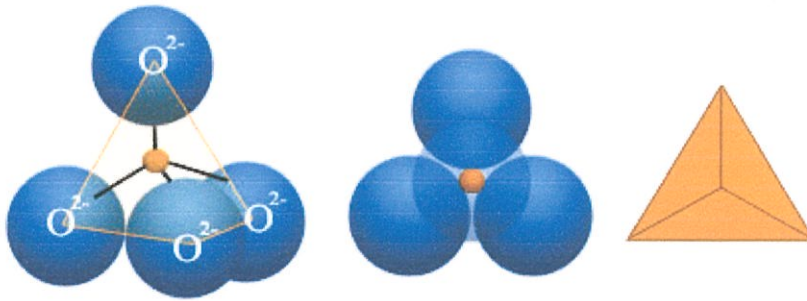
1.4.3 สามารถใช้เทคโนโลยีในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดใหม่ๆ และพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ ให้มีความทันสมัยมากขึ้น

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารพอลิเมอร์อนินทรีย์ที่เกิดจากการรวมกันของซิลิคอนและออกซิเจน ซึ่งจะมีสูตรทางเคมีเป็น  $\text{SiO}_2$  โดยจะมีซิลิคอนเป็นอะตอมกลาง และออกซิเจนล้อมรอบ ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.5 ซิลิกามีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีขาว ไม่มีกลิ่น น้ำหนักโมเลกุล 60.08 จุดเดือดมากกว่า  $2200^\circ\text{C}$  จุดหลอมเหลว  $1713^\circ\text{C}$  ความถ่วงจำเพาะ 2.2 ไม่ละลายน้ำ ไม่ไวไฟ มีความคงตัวทางเคมี และมีความเสถียรเมื่อสลายตัวจะเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเกิดการระเบิดได้ถ้าผสมกับอากาศ ถ้าหายใจเอาฝุ่นเข้าไปเป็นเวลานาน จะทำให้เป็นโรคถุงลมปอด เมื่อถูกผิวหนัง สัมผัสถูกตา กลืนหรือกินเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคือง [11]



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวกันแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกา [12.]

#### 2.1.1 ชนิดของซิลิกา

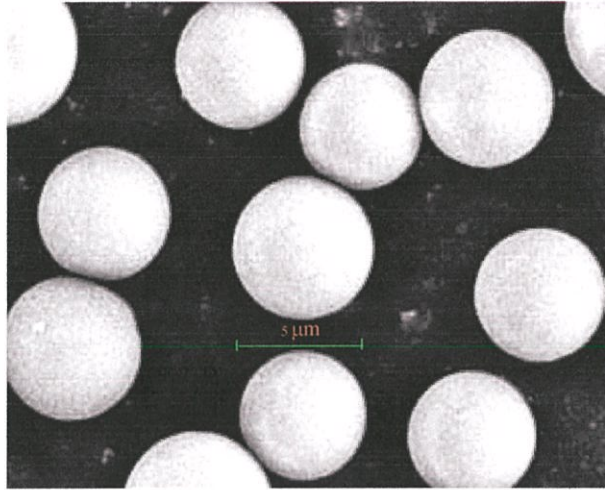
ซิลิกาแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

2.2.1.1 ซิลิกาแบบผลึก (Crystalline Silica) เป็นซิลิกาที่มีการจัดเรียง โครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และที่สังเคราะห์ขึ้น เช่น ควอตซ์ (Quartz), Tridymite, Cristobalite, Keatite และ Stishovite เป็นต้น

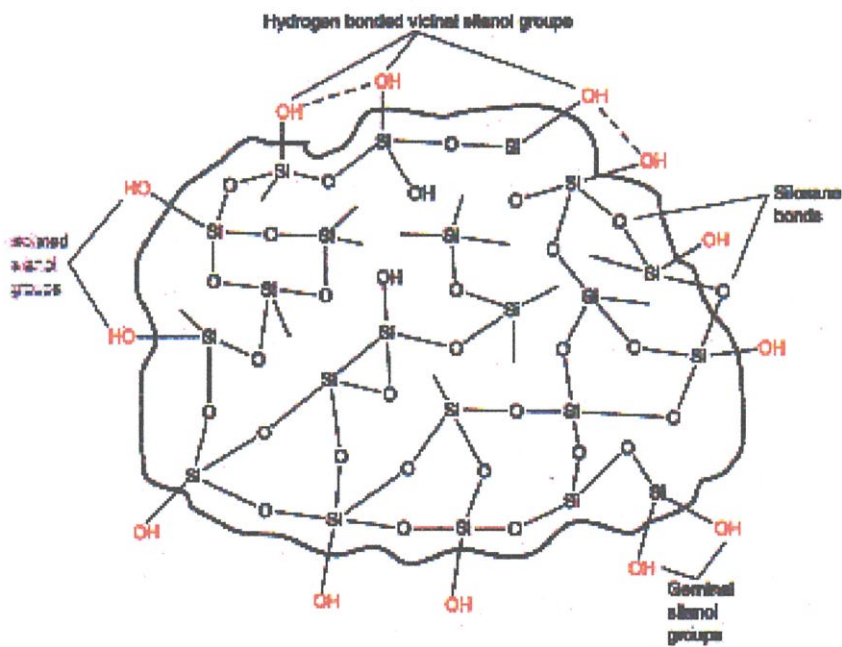
2.2.1.2 Microcrystalline Silica เป็นซิลิกาที่เกิดตามธรรมชาติ

2.2.1.3 ซิลิกาแบบไม่เป็นผลึก (Noncrystalline Silica) เป็นซิลิกาที่มีการจัดเรียงกันแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้ว และซิลิกาอสัญฐาน (Amorphous Silica)

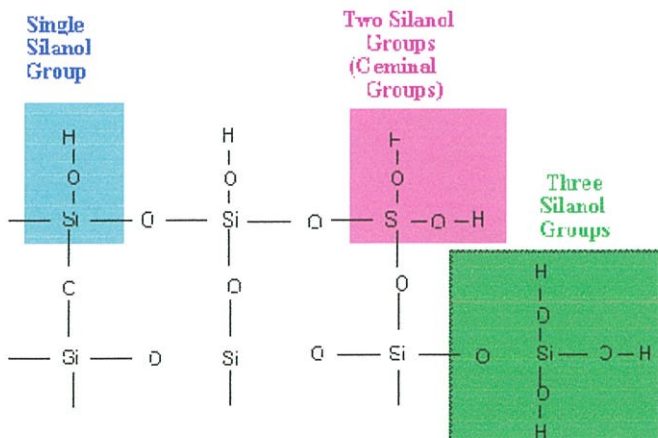
ซิลิกาอสัณฐานจะมีอนุภาคนาขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) และมีพื้นที่ผิวสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเฟสที่อยู่กับที่ (Stationary phase) ในทางโครมาโทกราฟี ภายในโครงสร้างจะมีรูพรุนขนาดเล็ก และต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ผิวจะมีหมู่ไฮดรอกซิลซิลานอล (Hydroxy Silanol Group :  $-\text{Si}-\text{OH}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



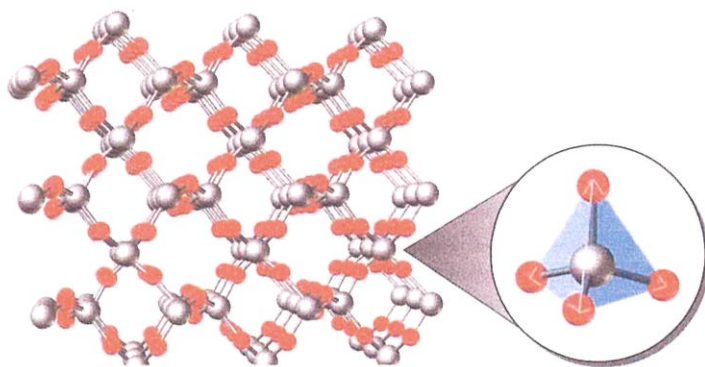
รูปที่ 2.2 ลักษณะของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ทำเฟสที่อยู่กับที่ของ HPLC [13]



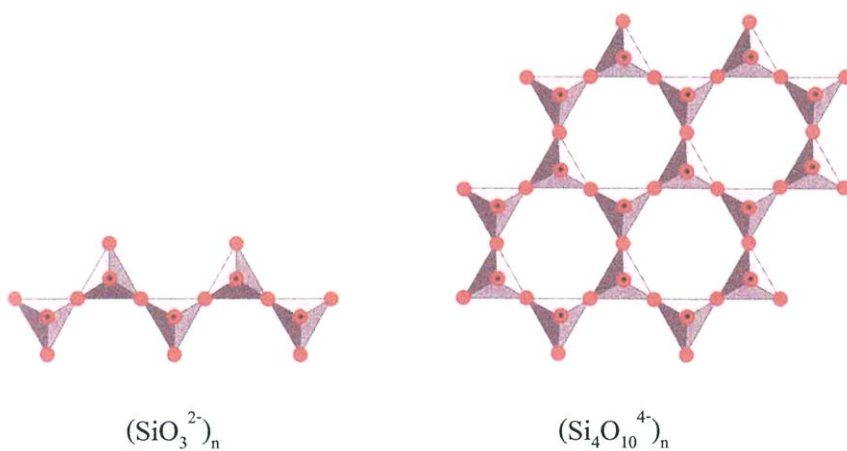
รูปที่ 2.3 โครงสร้างและการเกิดพันธะภายในโครงร่างตาข่ายของซิลิกา โดยที่ผิวจะมีหมู่ไฮดรอกซิลซิลานอล [14]



รูปที่ 2.4 หมู่ไฮดรอกซิลซิลานอลบนผิวของซิลิกาแบบต่างๆ [15]



แก้วควอตซ์จัดเรียงกันแบบเตตระฮีดรอล

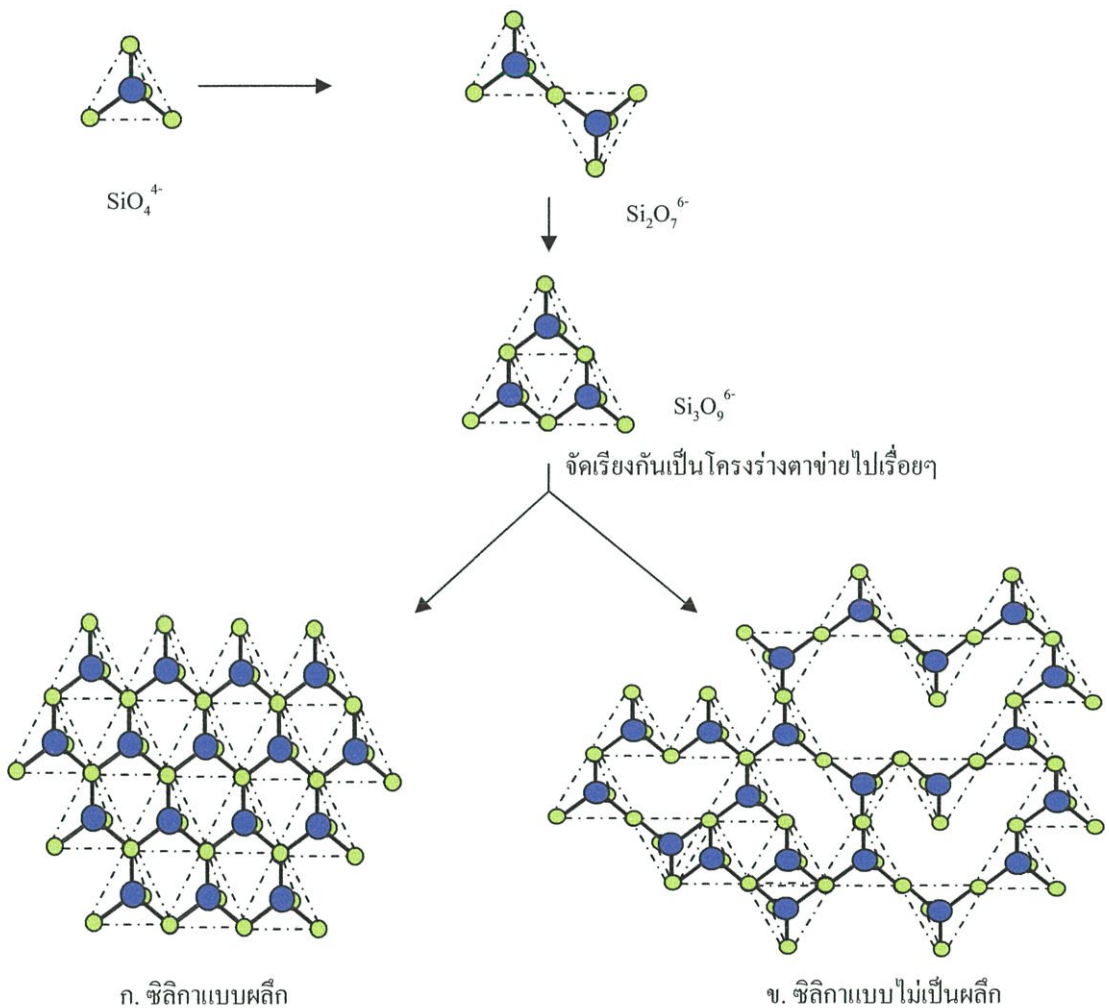


รูปที่ 2.5 ซิลิกาในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจัดเรียงกันแบบเตตระฮีดรอล [16]

### 2.1.2 การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารที่ทนต่อสารเคมี โดยปกติแล้วซิลิกาจะเป็นสารที่ทนต่อกรดเกือบทุกชนิดยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ในสถานะที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้ซิลิกาสามารถเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้หลายแบบ

การเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกาจะทำให้เกิดการจัดเรียงกันเป็นโครงร่างตาข่าย โดยที่ขั้นตอนของการเกิดจะเริ่มจากโมโนเมอร์ (monomer) รวมกันเป็นอนุภาค แล้วก็ขยายอนุภาคหลังจากนั้นจึงเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายไปเรื่อยๆ จนได้โมเลกุลโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่หรือที่เรียกว่าโครงร่างตาข่ายแบบไม่รู้จบดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบร่างตาข่ายของซิลิกาแบบผลึก (ก) และแบบไม่เป็นผลึก (ข) [17]

ประโยชน์ของซิติกาในด้านเคมีมีหลายอย่าง เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับไอออนของโลหะ ทำเป็นคอลัมน์ (Column) ในทางโครมาโทกราฟี ซึ่งจะใช้ซิติกาแบบมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นต้น และเนื่องจากที่พื้นที่ผิวของซิติกาจะมีหมู่ไฮดรอกซีไซทานอลอยู่จึงนิยมนำเอาสารบางชนิดมาเคลือบบนซิติกาเพื่อประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

## 2.2 ออโรโทลิดีน [18]

ออโรโทลิดีนเป็นชื่อทางเคมีทั่วไป และนอกจากนี้ยังมีชื่อพ้องอื่นๆ ได้แก่ 3,3'-ไดเมทิลเบนซิดีน (3,3'-Dimethylbenzidine), ดีเอ็มบี (DMB), ฟาสตราบลูเบสอาร์ (Fast Dark Blue Base R), 3,3'-ไดเมทิล-1,1'-ไบฟีนิล-4,4'-ไดเอมีน (3,3'-Dimethyl-1,1'-Biphenyl-4,4'-Diamine), 3,3'-ไดเมทิลไบฟีนิล-4,4'-ไดเอมีน (3,3'-Dimethylbiphenyl-4,4'-diamine), โทลิดีน (Tolidine), ไดเมทิลเบนซิดีน (Dimethyl benzidine), 3,3'-โทลิดีน 4,4'-ไบ-ออโร-โทลิดีน (3,3'-tolidine 4,4'-bi-o-tolidine), 4,4'-ไดอะมิโน-3,3'-ไดเมทิลไบฟีนิล (4,4'-diamino-3,3'-dimethylbiphenyl), ไดอะมิโนไดโทลิล (Diaminoditoly), ไบอะนิซิดีน (Bianisidine), ออโรออโรไพน์-โทลิดีน (o,o'-tolidine), ซีไอ 37230 (C.I. 37230), ซีไออะโซอิกไดอะโซคอมโพเนนท์ 113 (C.I. azoic diazo component 113), 3,3'-ไดเมทิลเบนซิดีน (ออโรโทลิดีน) [3,3'-Dimethylbenzidine (o-Tolidine)] หรือ ไดเมทิลเบนซิดีน 3,3'- (Dimethylbenzidine, 3,3')

ออโรโทลิดีนมีสูตรโมเลกุลคือ  $C_{14}H_{16}N_2$  สูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.7 และยังเป็นสารที่อยู่ในกลุ่มประเภท Aromatic Primary, Amine/diphenyl, diamine/Substitute, หรือ benzidene



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของออโรโทลิดีน [19]

ได้มีการนำออโรโทลิดีนมาใช้ประโยชน์สำหรับบำบัดน้ำเสีย และนอกจากนี้ก็ได้มีการนำออโรโทลิดีนมาใช้ประโยชน์ทางด้านเคมีวิเคราะห์ คือ ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของคลอรินอิสระตกค้าง ออโรโทลิดีนมีสถานะเป็นผงหรือผลึกสีขาวแดง เป็นสารที่ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 212.28 จุดเดือด 300 °C จุดหลอมเหลว 129 °C จุดเยือกแข็ง 131 °C ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ) เท่ากับ 1 ความสามารถในการละลายน้ำที่ 25 °C เท่ากับ 0.13 g/100 mL

โดยปกติอโซโทลิตินมีความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Stability of Reaction) ไม่เกิดอันตรายจากการสลายตัว ไม่เกิดอันตรายจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน แต่จะเข้ากันไม่ได้กับสารออกซิไดซ์ที่แรงหรือกรดเข้มข้นเพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง และควรเก็บในที่ปราศจากอากาศ แสงและความร้อน ในบางครั้งสารชนิดนี้อาจลุกไหม้ได้ถ้าได้รับความร้อนมากๆ ในระหว่างเกิดลุกไหม้จะเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ที่เป็นพิษ นอกจากนี้ก็สามารถเกิด คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ แอมโมเนีย ได้อีกด้วย

อโซโทลิตินมีค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity) หรือ LD<sub>50</sub> เท่ากับ 404 mg/kg เมื่อมีการสัมผัสทางหายใจจะทำให้โพรงจมูกเกิดการระคายเคือง ถ้าสัมผัสทางผิวหนังในระยะสั้นๆ จะไม่ทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนัง ถ้ากินหรือกลืนเข้าไปปริมาณ 100 mg 3 ครั้ง จะถูกขับออกมา 5.60-7.47 mg/วัน แต่ไม่มีรายงานการเกิดผลกระทบอื่น ในกรณีที่มีการสัมผัสถูกตาจะไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับมนุษย์แต่จะคล้ายกับการระคายเคืองต่อจมูก เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่มีคุณสมบัติคล้ายกันกับสารอะโซเมติกเอมีน เช่น benzidine แล้วอโซโทลิตินจะระคายเคืองตา และยังไม่มีการรายงานว่า การสัมผัสอโซโทลิตินเป็นเวลานานจะมีผลก่อให้เกิดการเป็นมะเร็ง แต่จะมีการศึกษาในหนูและกระต่ายพบว่าทำให้ไตวาย และทำลายตับ [20]

การเก็บรักษาควรเก็บในภาชนะบรรจุให้มิดชิด เย็นและแห้ง มีการระบายอากาศ และควรเก็บให้ห่างจากการสัมผัสแสงอาทิตย์โดยตรง แหล่งความร้อนและแหล่งจุดติดไฟ สารที่เข้ากันไม่ได้ เช่น สารออกซิไดซ์ ปรอทไฟฟอสเฟต ไฟ และแหล่งจุดติดไฟอื่นๆ กรณีที่เกิดการรั่วไหลไม่ควรสัมผัสกับสารโดยตรง ไม่ให้ไหลเข้าไปในท่อระบายหรือที่อับอากาศ และเก็บส่วนที่หกไว้ไหลด้วยดิน ทราซหรือวัสดุดูดซับซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีที่หกไว้ไหล หลังจากนั้นก็ฉีดล้างบริเวณที่หกไว้ไหลด้วยน้ำ การพิจารณาการกำจัด โดยต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

เมื่อได้รับสารควรต้องทำการปฐมพยาบาลเบื้องต้น คือ ถ้าหายใจเข้าไป ควรมีการป้องกันอย่างระมัดระวังก่อนที่จะเข้าไปช่วยเหลือ เช่น สวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม เคลื่อนย้ายแหล่งที่มีการปนเปื้อนออกไป หรือย้ายผู้ป่วยไปที่อากาศบริสุทธิ์ ควรปรึกษาแพทย์โดยทันที ถ้ากินหรือกลืนเข้าไป ห้ามให้สิ่งใดเข้าปากถ้าผู้ป่วยหมดสติ หรือมีอาการชักอย่างรุนแรง ให้ผู้ป่วยล้างปากด้วยน้ำอย่างทั่วถึง อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ 240 - 300 mL (8 ถึง 10 ออนซ์.) ถ้าเกิดการอาเจียนขึ้นเองให้ล้างปากด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง พาไปพบแพทย์โดยทันที ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ควรถอดเสื้อผ้าที่เปื้อนสารเคมี รองเท้าและเครื่องหนัง เช่น สายนาฬิกา เข็มขัดออกโดยเร็วถ้าเป็นไปได้ ให้ฉีดล้างด้วยน้ำอุ่น โดยให้น้ำค่อยๆ ไหลผ่านอย่างน้อย 20 นาที หรือจนกระทั่งสารเคมีออกหมด ส่งไปพบแพทย์ทันที ทำความสะอาดเสื้อผ้า รองเท้าและเครื่องหนังก่อนที่จะนำมาใช้ใหม่หรือนำไปทิ้ง ถ้าสัมผัสถูกตาอย่าให้ผู้ป่วยถูขยี้ตา ให้น้ำไหลผ่าน

เป็นเวลา 2-3 นาที ให้ผู้ป่วยฆ่าเชื้อตาไปทางซ้าย-ขวา และขึ้นลง ถ้ามีผงหรือฝุ่นที่เอาออกไม่ได้ล้างด้วยน้ำอุ่นบ่อยๆ ให้น้ำไหลผ่านอย่างน้อย 5 นาทีหรือจนกระทั่งผงหรือฝุ่นออกหมด เปิดเปลือกตาไว้ระยะหนึ่ง [20]

## 2.3 คลอรีน (Chlorine:Cl<sub>2</sub>) และคลอรีนอิสระตกค้าง (Free residual chlorine)

### 2.3.1 สมบัติและลักษณะของคลอรีน

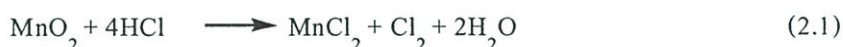
คลอรีนจากภาษากรีกว่า Chloros แปลว่าสี "เขียวอ่อน" เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 17 และสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Cl เป็นธาตุแฮโลเจน (กลุ่มO) มีลักษณะเป็นแก๊สสีเหลืองแกมเขียว มีกลิ่นฉุน ไม่พบในธรรมชาติ เป็นส่วนประกอบของเกลือทะเลและสารประกอบอื่น ๆ พบมากในธรรมชาติ และจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่ รวมถึงมนุษย์ด้วย ในรูปของแก๊สคลอรีนจะมีสีเขียวอมเหลือง มีน้ำหนักมากกว่าอากาศ 2.5 เท่า มีกลิ่นเหม็นอย่างมาก และเป็นพิษอย่างร้ายแรง เป็นตัวออกซิไดซ์ ฟอกขาว และฆ่าเชื้อได้เป็นอย่างดี [21]

#### 2.3.1.1 ประวัติของการค้นพบและใช้คลอรีน [22, 23, 24]

ค.ศ. 77 Pliny ชาวโรมันได้ทำการทดลองทางเคมีเพื่อแยกทองคำบริสุทธิ์ พบว่าเกิดสารไฮโดรเจนคลอไรด์ (กรดเกลือซึ่งมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ :HCl)

ค.ศ. 720-810 Geber นักเคมีชาวอาหรับพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่กรดกำถอง (HNO<sub>3</sub> 1 ส่วน ผสมกับ HCl 3 ส่วน ) จะได้แก๊สชนิดหนึ่งมีกลิ่นฉุนแต่ไม่ทราบว่าเป็นแก๊สคลอรีน

ค.ศ. 1774 Karl W. Scheele นักเคมีชาวสวีเดน ได้รับเกียรติว่าเป็นคนแรกที่ค้นพบแก๊สคลอรีน โดยการเผาส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO<sub>2</sub>) และกรด HCl ดังแสดงในสมการที่ 2.1



ค.ศ. 1814 Sir Humphry Davy ประกาศว่าแก๊สของ Scheele เป็นธาตุบริสุทธิ์ และให้ชื่อว่า chlorine ซึ่งมาจากภาษากรีกว่า chloros ซึ่งมีความหมายว่า เหลืองแกมเขียว

ค.ศ. 1830 Michael Faraday ผลิตและแยกคลอรีนได้จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี Electrolytic Cell

ค.ศ. 1900 มีการผลิตคลอรีนในช่วงนี้ ใช้เซลล์ไฟฟ้าระบบปรอท (Mercury Electrolytic Cell) และ ระบบไดอะแฟรม (Diaphragm Electrolytic Cell)

ค.ศ. 1923 มีการนำแก๊สคลอรีนมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นครั้งแรกที่มลรัฐเพนซิลวาเนีย

ค.ศ. 1930 อุตสาหกรรมเคมีเจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ได้มีการนำคลอรีนมาใช้งานอย่างกว้างขวางนอกเหนือจากคุณประโยชน์ในด้านการฟอกสีและฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

ปัจจุบันคลอรีนถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตพลาสติก PVC (Polyvinyl Chloride) ใช้ผลิตน้ำยาทำความสะอาดเสื้อผ้า เป็นส่วนประกอบของสารเคมีกำจัดศัตรูพืชจำพวก ออร์กาโนคลอรีน คลอรีนมีประโยชน์ดังนี้ [25]

1. ใช้ฆ่าเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ในน้ำดื่ม และน้ำในสระว่ายน้ำ
2. ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ ทำยาฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ทำสีผสมอาหาร ยาฆ่าแมลง สัตว์ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม พลาสติก เวชภัณฑ์ อุตสาหกรรมเท็กไทล์ ฯลฯ
3. ในทางอินทรีย์เคมีใช้ธาตุนี้เป็นออกซิไดซิงเอเจนต์ และในซัพสทิทิวชัน(Substitution) เพราะคลอรีนมีคุณสมบัติเคมีที่ต้องการในสารประกอบอินทรีย์ เมื่อเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจน (ในการผลิต ยางสังเคราะห์)
4. ใช้ในการผลิตสารชนิดต่างๆ เช่น คลอโรฟอร์ม (Chloroform), คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride) และใช้ในการสกัด

### 2.3.1.2 ลักษณะทั่วไปของคลอรีน [26, 27]

คลอรีนในสถานะอุณหภูมิและความดันปกติจะอยู่ในรูปแก๊สสีเขียวอ่อน ในสภาวะภายใต้ความดันจะเปลี่ยนเป็นของเหลวสีอำพัน ในสภาพแห้งคลอรีนจะไม่กัดกร่อนโลหะ แต่ถ้ามีความชื้นอยู่ด้วย จะทำให้มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ไม่ระเบิดและติดไฟแต่ช่วยให้ไฟติดเหมือนกับแก๊สออกซิเจน [3, 28, 29]

คลอรีนที่อยู่ในภาชนะบรรจุเป็นคลอรีนแห้ง และมีสภาพเป็นของเหลวอยู่ภายใต้ความดันสูง โดยความดันจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วนที่เป็นของเหลวบริเวณส่วนล่างของภาชนะบรรจุจะเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊ส ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 35 °C ความดันของแก๊สคลอรีนในภาชนะบรรจุจะเท่ากับ 10 เท่าของความดันบรรยากาศ ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 65 °C ความดันแก๊สภายในจะเท่ากับ 20 เท่าของความดันบรรยากาศ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อภาชนะบรรจุ ดังนั้นควรเก็บภาชนะบรรจุคลอรีนในที่ร่มและมีอากาศถ่ายเทสะดวก [3]

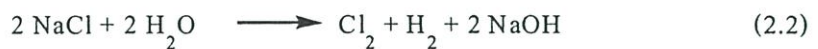
ในธรรมชาติคลอรีนอยู่ในรูปของคลอไรด์ไอออน (Chloride ion) หรือเป็นรูปของเกลือ ซึ่งละลายอยู่ในน้ำทะเลประมาณ 1.9 % ของมวลน้ำทะเลในมหาสมุทร คลอไรด์ไอออนที่พบทั่วไปได้แก่ ฮาไลต์ (Halite-โซเดียมคลอไรด์), ซิลไวต์ (Sylvite-โพแทสเซียมคลอไรด์), คาร์نالไลต์ (Carnallite-โพแทสเซียม แมกนีเซียม คลอไรด์ เฮกซาไฮเดรต) [30]

### 2.3.1.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของคลอรีน [31]

ในสถานะแก๊สจะเป็นสีเขียวอ่อน สถานะของเหลวเป็นสีเหลืองอำพัน กลิ่นฉุนแสบจมูก จุดหลอมเหลว - 101 °C จุดเดือด -34.6 °C เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สปริมาตรเพิ่มขึ้น 460 เท่า หนักกว่าอากาศ 2.5 เท่า ละลายน้ำได้เล็กน้อย

### 2.3.1.4 กระบวนการผลิตแก๊สคลอรีน [22, 32, 33]

ในอุตสาหกรรมการผลิตคลอรีนนั้นจะใช้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยจะใช้โซเดียมคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นสารตั้งต้น กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการคลอไรด์อัลคาไล ดังแสดงในสมการที่ 2.2



หลักการผลิตแก๊สคลอรีนก็คือใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแยกน้ำเกลือซึ่งทำยาลแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ โซดาไฟ (Caustic Soda) แก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) และมีแก๊สไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) วิธีหลักในการผลิตแก๊สคลอรีน โดยใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในเชิงอุตสาหกรรมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมี 3 วิธี ได้แก่

1. วิธีเซลล์ปรอท (Mercury Electrolytic Cell) วิธีนี้จะได้โซดาไฟประมาณ 50 %
2. วิธีเซลล์ไดอะแฟรม (Diaphragm Electrolytic Cell) วิธีนี้จะได้โซดาไฟค่อนข้างน้อย ประมาณ 10 - 12 %
3. วิธีเซลล์เมมเบรน (Membrane Electrolytic Cell) วิธีนี้ในปัจจุบันนิยมใช้กันมาก เนื่องจากไม่มีการใช้สารปรอท ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และเปอร์เซ็นต์โซดาไฟใกล้เคียงกับวิธีที่ใช้เซลล์ปรอท คือ ประมาณ 30 -40 %

### 2.3.1.5 สารประกอบของคลอรีน [34]

คลอรีนสามารถรวมกับธาตุอื่นและเกิดสารประกอบดังต่อไปนี้

1. คลอเรต (Chlorate :  $\text{ClO}_3^-$ )
2. คลอไรต์ (Chlorite :  $\text{ClO}_2^-$ )
3. ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite :  $\text{ClO}^-$ )
4. เปอร์คลอเรต (Perchlorate :  $\text{ClO}_4^-$ )
5. คลอรามิน (Chloramine :  $\text{NH}_2\text{Cl}$ )
6. คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide :  $\text{ClO}_2$ )

7. กรดคลอริก (Chloric acid :  $\text{HClO}_3$ )
8. คลอรีนโมโนฟลูออไรด์ (Chlorine monofluoride :  $\text{ClF}$ )
9. คลอรีนไตรฟลูออไรด์ (Chlorine trifluoride :  $\text{ClF}_3$ )
10. คลอรีนเพนตะฟลูออไรด์ (Chlorine pentafluoride :  $\text{ClF}_5$ )
11. ไดคลอรีนมอนอกไซด์ (Dichlorine monoxide:  $\text{Cl}_2\text{O}$ )
12. ไดคลอรีนเฮปตอกไซด์ (Dichlorine heptoxide :  $\text{Cl}_2\text{O}_7$ )
13. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid :  $\text{HCl}$ )
14. กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid :  $\text{HClO}_4$ )

### 2.3.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเติมคลอรีนในน้ำ [35, 36, 37, 38, 39]

คลอรีนที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา และในกระบวนการบำบัดน้ำโดยทั่วไปนอกจากอยู่ในรูปแก๊สแล้วยังมีใช้ในรูปของคลอรีนน้ำ และคลอรีนผง [40, 41] ดังนี้

แก๊สคลอรีน ( $\text{Cl}_2$ ) เป็นแก๊สสีเขียว – เหลือง กลิ่นฉุน เหมาะสำหรับระบบการผลิตน้ำที่ต้องมีผู้ดูแลเป็นชำนาญการ และต้องขอใบอนุญาตการใช้

คลอรีนน้ำ ( $\text{NaClO}$ ) หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ ความหมายต่างจากคลอรีนแก๊สที่อยู่ในรูปของเหลว มีลักษณะเป็นสารละลายสีเขียวอ่อน กลิ่นฉุน มีปริมาณคลอรีนที่ใช้งานได้ในช่วง 7 -15 % ชื่อทางการค้าอาจมีหลายชื่อเช่น Liquid Bleach Pure Chlor และ Top Chlor เป็นต้น น้ำยาซักผ้าขาวในท้องตลาดบางยี่ห้อก็มีคลอรีนน้ำเป็นส่วนประกอบ คลอรีนประเภทนี้ใช้งานง่าย แต่ราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สคลอรีน ส่วนใหญ่นิยมใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต (Process Water) ของโรงงานอุตสาหกรรม ใช้ในครัวเรือน มีอายุการใช้งานสั้นกว่าคลอรีนรูปแบบอื่น และไม่นิยมใช้ในงานประปาเนื่องจากราคาค่อนข้างแพง [42]

คลอรีนผง [ $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ] มีลักษณะเป็นเกล็ด เม็ด หรือผงคล้ายแป้งสีขาว กลิ่นฉุน ปริมาณคลอรีนที่ใช้งานได้ในช่วง 65-71 % ใช้งานไม่สะดวกเหมือนคลอรีนน้ำ เวลาใช้งานต้องนำมาละลายน้ำ แล้วนำส่วนที่เป็นของเหลวไปใช้งาน เหมาะสำหรับงานประปาขนาดเล็กที่อยู่ในพื้นที่ทุรกันดาร ระบบประปาหมู่บ้าน ใช้ในครัวเรือน เนื่องจากขนส่งง่ายมีความปลอดภัยสูง

ขั้นตอนของการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีการใช้คลอรีนผงแคลเซียมหรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะใช้ในอัตราส่วน 6–20 g ต่อน้ำ 1000 kg ถ้าเป็นคลอโรกซ์หรือน้ำยาฟอกสีใช้ในปริมาณ 36–120 mg ต่อน้ำ 1000 kg เมื่อใส่คลอรีนไปแล้วก่อนที่จะนำน้ำไปใช้ต้องใส่เครื่องเป่าอากาศทิ้งไว้ประมาณ 3–4 วันเพื่อให้คลอรีนสลายตัวจนหมด ถ้าไม่แน่ใจว่าการสลายตัวของคลอรีนจะหมดอย่างสมบูรณ์หรือไม่ให้ใช้โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) ใส่น้ำลงไป

ในน้ำด้วยอัตราส่วน 1 g ต่อ น้ำ 1000 kg เพื่อช่วยกำจัดคลอรีนที่เหลืออยู่ให้หมดไป วิธีทดสอบการตกค้างของคลอรีนในน้ำ ทำได้โดยใส่โปแตสเซียมไอโอไดด์ 2-3 เกล็ด ถ้าน้ำยังมีสีน้ำตาลคงอยู่แสดงว่ายังมีสารคลอรีนเหลืออยู่ [43]

คลอรีนอิสระตกค้างจะเกิดจากปฏิกิริยาการเติมคลอรีนลงไป ในน้ำหรือที่เรียกว่า กระบวนคลอรีเนชัน [44, 45] ส่วนมากจะพบได้ทั้งในน้ำประปา น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งน้ำจากสระว่ายน้ำ ซึ่งจะต้องมีการควบคุมปริมาณของคลอรีนอิสระตกค้างให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เพราะถ้าปล่อยให้มีปริมาณที่เกินมาตรฐานจะทำให้เกิดอันตรายได้ ซึ่งในกระบวนการคลอรีเนชันจะเกิดจากการเติมแก๊สคลอรีน คลอรีนน้ำ หรือคลอรีนผงดังแสดงในรูปที่ 2.8 [46, 47]

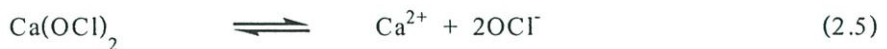
แก๊สคลอรีนเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ให้กรดไฮโปคลอรัส และ กรดไฮโดรคลอริก ดังแสดงในสมการที่ 2.3



กรด HOCl แยกตัวในน้ำจะให้ไฮโดรเจนไอออนและไฮโปคลอไรต์ไอออนดังแสดงในสมการที่ 2.4

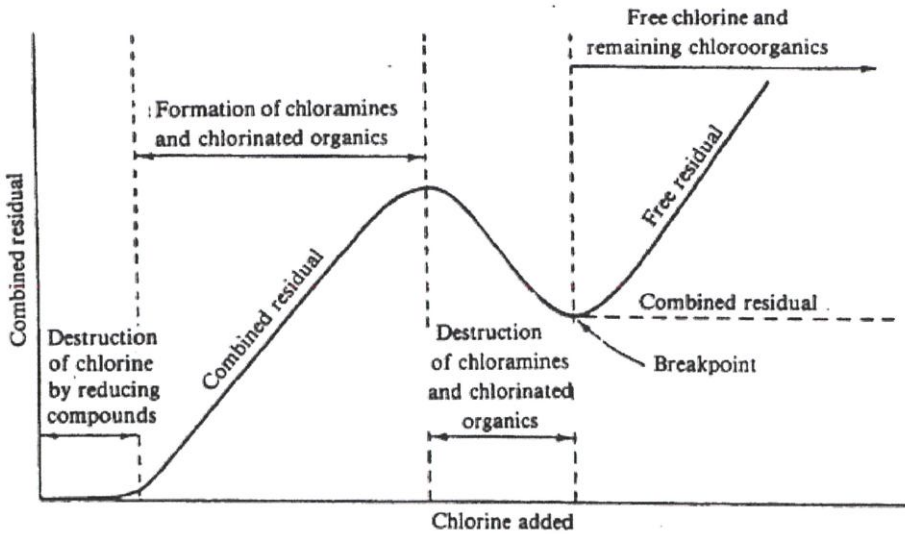


ในกรณีที่เติมแคลเซียมไฮโปคลอไรต์  $[\text{Ca}(\text{OCl})_2]$  ลงในน้ำจะเกิดการละลายได้ดังนี้



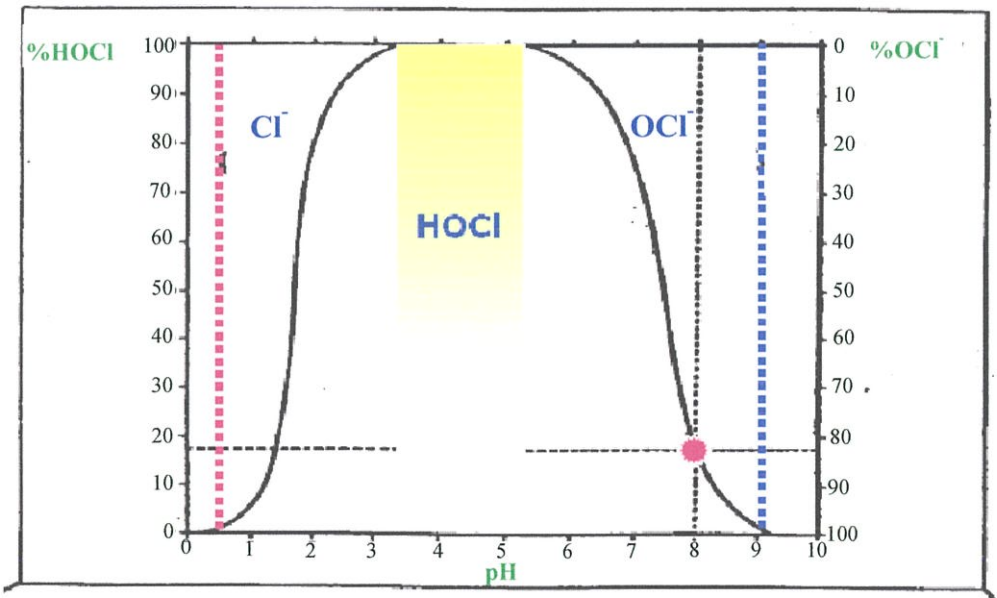
ข้อเสียในการเติมคลอรีนลงในน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reaction) กับสารอื่นๆ ในน้ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อลดลง โดยที่ pH ต่ำจะเกิด HOCl ที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคดีกว่า  $\text{OCl}^-$

$\text{Cl}_2$ , HOCl และ  $\text{OCl}^-$  เรียกว่าคลอรีนอิสระตกค้าง ปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันจะขึ้นอยู่กับสภาพ pH ของน้ำ



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาของคลอรีนเมื่อเติมลงในน้ำจะเกิดเป็นคลอรีนในแบบต่างๆ กัน [48]

ที่ pH ของน้ำต่ำกว่า 1 คลอรีนอิสระตกค้างจะอยู่ในรูปของแก๊สทั้งหมด และจะระเหยสู่บรรยากาศ ที่ pH 1-3.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของแก๊ส และ HOCl ที่ pH ในช่วง 3.5-5.5 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูป HOCl ทั้งหมด ที่ pH ในช่วง 5.5-9 จะอยู่ในรูปของ HOCl และ OCl<sup>-</sup> และที่ pH ตั้งแต่ 9 ขึ้นไป จะอยู่ในรูป OCl<sup>-</sup> ดังแสดงในรูปที่ 2.9

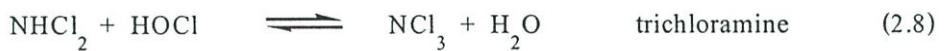
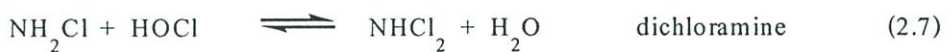
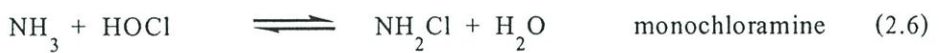


รูปที่ 2.9 ผลของ pH และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระตกค้าง [49]

คลอรีนอิสระในรูป HOCl มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมกกว่าคลอรีนในรูป OCl<sup>-</sup> ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง ควรจะมีคลอรีนในรูปของ HOCl เหลืออยู่ในน้ำตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทั้งแบบที่เรื้อรังและไวรัส โดยทั่วไปปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 mg/L โดยที่ pH ของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU

### 2.3.3 การเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนกับแอมโมเนีย (Ammonia : NH<sub>3</sub>) [50, 51, 52]

ในน้ำผิวดินส่วนมากจะมีแอมโมเนียเหลืออยู่ในน้ำซึ่ง Cl<sub>2</sub> หรือ HOCl จะสามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับ pH ของน้ำ ปริมาณของแอมโมเนียและ Cl<sub>2</sub> โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นคลอรีนอิสระตกค้างอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า คลอรามินหรือคลอรีนอิสระคงเหลือ ได้แก่ โมโนคลอรามิน (NH<sub>2</sub>Cl) ไดคลอรามิน (NHCl<sub>2</sub>) และไตรคลอรามิน (NCl<sub>3</sub>) [35, 36] ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความสามารถในการฆ่าเชื้อได้ต่างๆ กัน ดังแสดงในสมการที่ 2.6, 2.7 และ 2.8



โดยจะใช้โมโนคลอรามินและไดคลอรามินซึ่งมีกำลังในการฆ่าเชื้อโรคมกในการวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในน้ำ

คลอรีนอิสระคงเหลือมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคต่ำ แต่คงทนอยู่ในน้ำได้ยาวนานกว่าคลอรีนอิสระ คลอรีนอิสระตกค้างและคลอรีนอิสระคงเหลือรวมกันเรียกว่าคลอรีนคงเหลือทั้งหมด (Total residual chlorine) [53, 54]

สำหรับปฏิกิริยาของคลอรีนน้ำและคลอรีนผงในน้ำ [55, 56] แสดงดังในสมการที่ 2.9 และ 2.10



การใช้คลอรีนน้ำและผง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สคลอรีน จะเห็นว่าการใช้คลอรีนน้ำและผงจะทำให้แนวโน้มของค่า pH เป็นไปในทางที่สูงขึ้น เนื่องจากตามสมการเคมีจะมีค่าแตกต่างกัน แต่การใช้แก๊สคลอรีนจะทำให้แนวโน้มของค่า pH ในน้ำต่ำลงเนื่องจากมีกรดเกิดขึ้น ดังนั้นการใช้แก๊สคลอรีนฆ่าเชื้อโรคตามทฤษฎีแล้วจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้คลอรีนรูปอื่น แต่ในทางปฏิบัตินั้นผลไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะปริมาณคลอรีนที่ใช้้น้อยมากผลกระทบต่อ pH ของน้ำจึงค่อนข้างน้อย

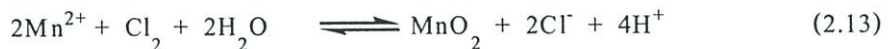
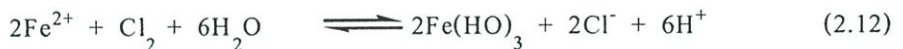
สรุป คลอรีนในน้ำประปาทั่วไปจะมีทั้งคลอรีนอิสระตกค้าง (HOCl และ OCl<sup>-</sup>) และคลอรามิน (Combined residual chlorine)

$$\text{Total Residual Chlorine} = \text{Free residual chlorine} + \text{Combined residual chlorine}$$

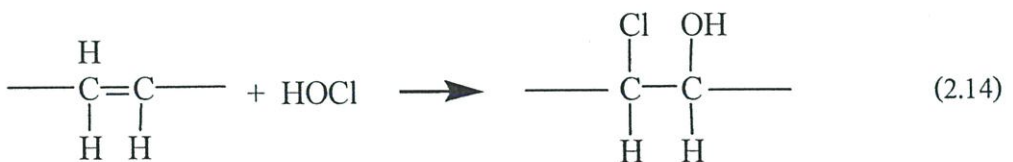
### 3.3.4 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของคลอรีน [35, 57, 58]

คลอรีนสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงกับสารพวกฟีนอล เกิดโมโนคลอรามิน ไดคลอรามิน และไตรคลอรามิน [51] ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำเกิดกลิ่นและรสในน้ำได้ ดังนั้น U.S. Public Health Service จึงได้มีการกำหนดค่าของสารประกอบฟีนอลในน้ำประปาจะต้องมีค่าไม่เกิน 1 µg/L

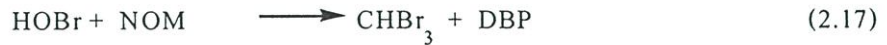
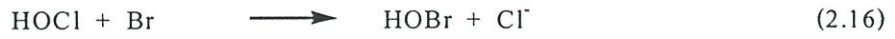
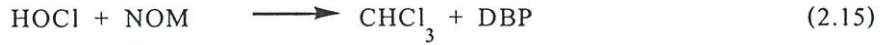
คลอรีนจะเกิดปฏิกิริยากับสารลดออกซิเจนในน้ำ เช่น H<sub>2</sub>S, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> และ NO<sub>2</sub><sup>-</sup> ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



นอกจากนี้คลอรีนหรือ HOCl ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ซึ่งมีแขนไม่อิ่มตัว (Unsaturated Linkage) ทำให้ความต้องการคลอรีนของน้ำ (Chlorine Demand) สูงขึ้น ดังปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



คลอรีนในรูปของ HOCl และ OCl<sup>-</sup> จะทำปฏิกิริยาธรรมชาติ (Natural Organic Matter : NOM) ที่อยู่ในน้ำ คือ ฮิวมิกแล้วเกิดสารก่อมะเร็งประเภทไตรฮาโลมีเทน [Trihalomethanes : THM เช่น CHCl<sub>3</sub> (Chloroform), CHBr<sub>3</sub> (Bromoform)] และ DBP (Disinfection By Product) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



นอกจากนี้แล้วฮาโลเจนตัวอื่น เช่น โบรมีนก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้เกิดเป็น HOBr ซึ่งเป็นสารฆ่าเชื้อโรคและทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าคลอรีน จะมีผลทำให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วขึ้น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

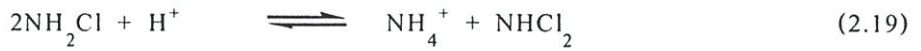


### 2.3.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนอิสระตกค้าง [35, 36, 50]

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำคือเวลาในการสัมผัส (Contact time) และ ความเข้มข้นของคลอรีน [59, 60] ซึ่ง คลอรีนอิสระตกค้างจะหมายถึง Cl<sub>2</sub>, HOCl และ OCl<sup>-</sup> โดยพบว่าที่ pH ต่ำๆ จะอยู่ในรูปของ HOCl มากกว่า OCl<sup>-</sup> และ HOCl จะมีผลในการฆ่าเชื้อได้ดีกว่า ส่วนโมโนคลอรา มีน ไคคลอรา มีน และไตรคลอรา มีน จะเรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือในกรณีที่ใช้เวลาในการสัมผัส คงที่ต้องใช้ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงเหลือในการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าคลอรีนอิสระตกค้างดังนั้น จึงต้องทราบความเข้มข้นของคลอรีนอิสระตกค้าง [57]

อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่าง HOCl กับ NH<sub>3</sub> ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ pH ซึ่งพบว่าที่ pH 8.3 จะเกิดอัตราเร็วสูงสุด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อค่า pH ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้ ดังนั้นจึงพบว่า เวลาของการสัมผัส 10 15 หรือ 60 นาทีที่คลอรีนอิสระตกค้างกับคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่รวมกัน

สารประกอบคลอรา มีนซึ่งเกิดจาก NH<sub>3</sub> กับ Cl<sub>2</sub> ในอัตราส่วนที่ต่างกันก็จะเกิดคลอรา มีนต่างชนิดกัน เช่น ถ้าอัตราส่วนของ Cl<sub>2</sub> : NH<sub>3</sub> เป็น 1:1 จะเกิดเป็น โมโนคลอรา มีนและไคคลอรา มีน และพบว่าที่ pH ต่ำจะเกิดเป็นไคคลอรา มีนมากกว่า ดังแสดงในสมการที่ 2.19



ถ้าอัตราส่วนของ  $\text{NH}_3 : \text{Cl}_2$  มากขึ้นก็จะเกิดเป็นไตรคลอรามิน และเกิดการออกซิไดส์  $\text{NH}_3$  บางส่วนไปเป็น  $\text{N}_2$  โดยปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์เมื่อเติม  $\text{Cl}_2$  2 mol ลงไปใน  $\text{NH}_4\text{-N}$  ที่อยู่ในน้ำ 1 mol โดยพบว่าเกิดคลอรามินตกค้างมากที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนของ  $\text{Cl}_2 : \text{NH}_3$  เป็น 1:1 และจะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนของ  $\text{Cl}_2 : \text{NH}_3$  เป็น 2:1 แต่ถ้ามีการเติม  $\text{Cl}_2$  ต่อไปเรื่อยๆ ก็จะเกิดเป็นคลอรีนตกค้าง โดยเมื่อเติมคลอรีนจนกระทั่ง  $\text{NH}_3$  ถูกเปลี่ยนไปเป็นไตรคลอรามิน หรือถูกออกซิไดส์ไปเป็น  $\text{N}_2$  หรือแก๊สอื่น เรียกว่า Superchlorination หรือคลอรีนอิสระตกค้าง หรือ Break-Point Chlorination

เนื่องจากไตรคลอรามินหรือ Nitrogen trichloride ( $\text{NCl}_3$ ) จะเป็นสารที่มีกลิ่น ดังนั้นจึงต้องหาวิธีควบคุมโดยการเติมคลอรีนให้มีค่ามากเกินไปเกินความต้องการคลอรีนของน้ำ ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนเป็นไตรคลอรามินให้เป็นสารที่ไม่มีกลิ่นประเภท  $\text{N}_2, \text{N}_2\text{O}$  ดังแสดงในสมการที่ 2.20



### 2.3.6 Superchlorination, คลอรีนอิสระตกค้างหรือ Break-Point Chlorination [35, 50]

Superchlorination หมายถึง การเติมคลอรีนในกระบวนการบำบัดน้ำให้มีขนาดมากเกินไปเพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ แอมโมเนีย เหล็ก และสารลดออกซิเจนในน้ำ รวมถึงการออกซิไดส์แอมโมเนียอิสระในน้ำดิบนั้น บางครั้งก็เรียกว่า คลอรีนอิสระตกค้าง หรือ Break-Point Chlorination ซึ่งคลอรีนอิสระตกค้างจะมีความไวกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือสามารถตรวจหาได้โดยวิธี Orthotolidine Arsenite Method (O.T.A. method)

### 2.3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ

**2.3.7.1 pH ของน้ำ** ดังได้กล่าวไว้แล้ว ถ้า pH สูง คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ  $\text{OCl}^-$  ในเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคต่ำลงมาก ยิ่งในกรณีน้ำจากระบบหล่อเย็นซึ่งส่วนใหญ่ pH เกือบถึง 9 ประสิทธิภาพการทำลายเชื้อโรคเกือบจะหมดไป ดังนั้นการเติมคลอรีนในน้ำหล่อเย็นประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจะต่ำมาก

**2.3.7.2 อุณหภูมิ** ซึ่งอุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการได้แก่ ปริมาณชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ กรณีที่อุณหภูมิของน้ำต่ำคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ  $\text{HOCl}$  มาก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรค ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของน้ำ

สูง คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ HOCl น้อย อีกประการหนึ่งก็คือ อุณหภูมิสูงจะทำให้คลอรีนสลายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิค่าเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของคลอรีนต่ำลงด้วย

**2.3.7.3 เวลา** ถ้าเวลาที่สัมผัสน้ำ (Contact time) นานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าเวลาที่สัมผัสน้ำน้อยลงประสิทธิภาพจะต่ำลง [61]

**2.3.7.4 ความเข้มข้น** เช่นเดียวกับเวลาถ้าความเข้มข้นของคลอรีนสูงประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะสูง

โดยทั่วไปเมื่อต้องการจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ปัจจัยที่ควรพิจารณาคือค่า C.T (mg-min/L)

$C =$  ความเข้มข้นของคลอรีนที่เหลือ (mg/L) ,  $T =$  เวลาสัมผัส (นาที)

ตัวอย่างเช่น สาร A และ สาร B มี ค่า C.T ในการฆ่าเชื้อโรค C เท่ากับ 5 และ 6 mg-min/L ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า สาร A มีประสิทธิภาพมากกว่าสาร B

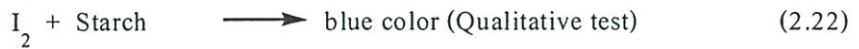
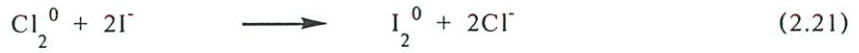
ในกรณีสารชนิดเดียวกันถ้ารู้ค่า C.T เราสามารถ จะเลือกได้ว่าจะให้มีเวลาสัมผัสนานเท่าไรโดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นที่เหลือ ตัวอย่างเช่น ค่า C.T ของคลอรีนในการฆ่าเชื้อโรค เท่ากับ 3 mg-min/L หมายความว่าในเวลา 10 นาที จะต้องเติมคลอรีนลงในน้ำแล้ววัดคลอรีนที่เหลือให้ได้ 0.3 mg/L หรือถ้าต้องการใช้เวลาสั้นลงเหลือ 1 นาที จะต้องเติมคลอรีนแล้วให้มีคลอรีนเหลืออยู่ในน้ำ 3 mg/L เป็นต้น

**2.3.7.5 สารอินทรีย์ในน้ำ** ในกรณีที่น้ำมีสารอินทรีย์สูงจะทำให้คลอรีนมีประสิทธิภาพด้อยลงเนื่องจากคลอรีนที่เติมลงไปจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ก่อนทำให้เหลือคลอรีนที่จะไปฆ่าเชื้อโรคน้อย นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับสารอินทรีย์ในน้ำยังทำให้เกิดสารจำพวก THMs (Trihalomethane) ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย ดังนั้นในกรณีที่น้ำมีสารอินทรีย์สูง (วัดได้ในรูปของ TOC) จะต้องกำจัดสารอินทรีย์ให้เหลือน้อยก่อนที่จะมีการเติมคลอรีน เพื่อที่จะไม่สิ้นเปลืองคลอรีน และไม่ก่อให้เกิดสารพิษ ในกรณีที่ไม่ต้องกำจัดสารอินทรีย์ก่อน เนื่องจากความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต อาจเปลี่ยนสารฆ่าเชื้อโรคจากคลอรีนเป็นชนิดอื่นซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน

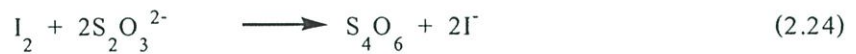
### 2.3.8 วิธีการวิเคราะห์หาคลอรินอิสระ [35, 36, 50, 62]

#### 2.3.8.1 Starch Iodine Method (หรือ Iodometric Method)

ใช้หาคลอรินคงเหลือทั้งหมด [63] โดยที่คลอรินอิสระตกค้างและคลอรินอิสระคงเหลือสามารถออกซิไดส์  $I^-$  ให้เป็น  $I_2$  ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

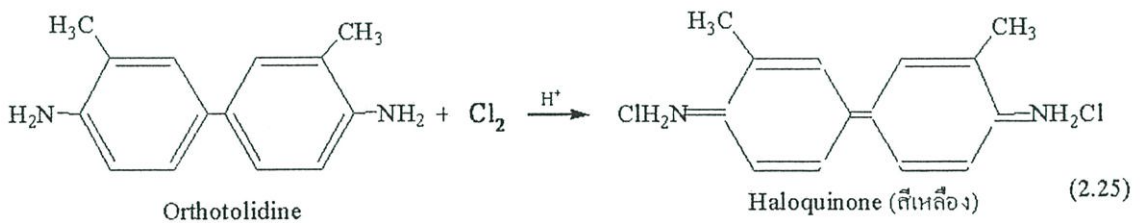


เมื่อไทเทรต  $I_2$  ด้วยสารละลายมาตรฐาน  $Na_2S_2O_3$  จะสามารถหาปริมาณของคลอรินตกค้างได้ ซึ่ง  $Na_2S_2O_3$  จะเป็นตัวลดออกซิเจน เมื่อถึงจุดยุติจะทำให้สีน้ำเงินจางหายไป ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



#### 2.3.8.2 Orthotolidine Method [64, 65]

ใช้หาคลอรินคงเหลือทั้งหมด โดยใช้สารออร์โธทอลิดีนทำปฏิกิริยากับคลอรินที่อยู่ในน้ำ ในสถานะที่เป็นกรด คลอริน คลอรามีน และตัวเติมออกซิเจนอื่นๆ จะออกซิไดส์ออร์โธทอลิดีนให้กลายเป็นฮาโลควิโนน (Haloquinone) ซึ่งเป็นสารสีเหลือง โดยที่สารฮาโลควิโนนจะเกิดเป็นสีเหลืองที่ pH น้อยกว่า 1.8 และความเข้มของสีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของคลอรินตามกฎของเบียร์ (Beer's Law) ดังแสดงในสมการที่ 2.25





### 2.3.8.5 Amperometric Titration

วิธีนี้ใช้หาคลอรีนคงเหลือทั้งหมด คลอรีนอิสระคงเหลือและคลอรีนอิสระตกค้าง สารเคมีที่ใช้และการเตรียมสารจะเหมือนกับวิธี Starch Iodine Method แต่จะแตกต่างกันตรงที่ Starch Iodine Method จะให้วิธีตรวจสอบจุดยุติด้วยการไทเทรต แต่วิธีนี้ตรวจสอบจุดยุติด้วยเครื่องแอมเพอโรเมตริกไทเทรเตอร์ (Amperometric Titrator) ซึ่งการทำงานของเครื่องนี้จะอาศัยหลักการของโพลารोगราฟิ (Polarographic) การที่จะตรวจสอบว่าเป็นคลอรีนแบบใดนั้นจะใช้ช่วง pH ในการไทเทรตที่แตกต่างกันคือ คลอรีนอิสระคงเหลือจะทำปฏิกิริยาที่ pH 3.5-4.5 ส่วนคลอรีนอิสระตกค้างจะทำปฏิกิริยาที่ pH 6.5 -7.5

### 2.3.8.6 DPD Ferrous Titrimetric Method

วิธีนี้ใช้หาคลอรีนคงเหลือทั้งหมด คลอรีนอิสระคงเหลือและคลอรีนอิสระตกค้าง ซึ่งจะใช้ N,N-Diethyl-p-Phenylenediamine (DPD) เป็นอินดิเคเตอร์ และใช้เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเป็น ไทเทรนต์

### 2.3.8.7 DPD Colorimetric Method

วิธีนี้จะอาศัยหลักการคล้ายกับ DPD Ferrous Titrimetric Method [67] แต่จะวัดความเข้มของสีที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยใช้วัดที่ความยาวคลื่น 515 nm

### 2.3.8.8 Syringaldazine (FACTS) Method

วิธีนี้จะใช้สำหรับหา Free (available) chlorine ซึ่งใช้สาร Syringaldazine (3,5-dimethoxy-4-hydroxybenzaldazine) ใน 2-propanol ซึ่งคลอรีนอิสระจะออกซิไดส์ Syringaldazine ในอัตราส่วน 1:1 molar basis เกิดเป็นสารที่มีสี แล้วจึงวัดความเข้มของสีที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยใช้วัดที่ความยาวคลื่น 530 nm

## 2.3.9 ข้อดีและข้อเสียของคลอรีน

### 2.3.9.1 ข้อดีของคลอรีน [34, 68, 69]

คลอรีนนอกจากจะใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติก ยางแผ่น ใช้น้ำยาฟอกสีเยื่อกระดาษ ตลอดจนเส้นใยผ้า ยังใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะราคาไม่แพงและนอกจากนี้คลอรีนมีข้อได้เปรียบสารอื่นๆที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคในน้ำหลายประการได้แก่

1. ราคาถูกเหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจของสังคมไทยเมื่อเปรียบเทียบกับสารที่ใช้ฆ่าเชื้อโรคชนิดอื่นๆ เช่น โอโซน คลอรีนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น
2. หาซื้อง่ายมีจำหน่ายทั่วไป
3. มีให้เลือกใช้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นแก๊สคลอรีน คลอรีนน้ำ และคลอรีนผงซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ต้องการบำบัด
4. การเติมคลอรีนลงในน้ำค่อนข้างง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อน

### 2.3.9.2 ข้อเสียของคลอรีน [25, 49, 71]

ถึงแม้ว่าคลอรีนจะมีประโยชน์มากมายก็ตาม แต่ถ้าใช้ในระดับความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานแล้ว ก็มีผลเสียได้มากเหมือนกัน โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อ ถ้าไม่มีกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งอย่างถูกต้องแล้วปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมก็จะทำให้มีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ โดยเฉพาะคลอรามินจะคงความเป็นพิษได้นานกว่าคลอรีนอิสระ และพบว่าไคคลอรามินจะมีพิษรุนแรงที่สุด ส่วนกรดไฮโปคลอรัสจะมีพิษมากกว่าไอออนของไฮโปคลอรัส ผลเสียของคลอรีนได้แก่

1. กรณีที่น้ำมีปริมาณสารอินทรีย์สูง จะทำให้สิ้นเปลืองคลอรีนมาก เพราะว่าคลอรีนส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ นอกจากนี้คลอรีนที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะให้ผลิตภัณฑ์พลอยได้พวก THMs ซึ่งเป็นสารพิษ เป็นโทษต่อร่างกาย

2. ในกรณีที่น้ำมีค่า pH สูงเกิน 8 ขึ้นไปประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะลดลงเนื่องจากคลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ OCl<sup>-</sup> ดังนั้นการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนต้องปรับ pH ไม่ให้สูงเกินไป

3. คลอรีนไม่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ Protozoa จำพวก *Giardia sp.* และ *Cryptosporidium sp*

4. คลอรีนเมื่อมีความเข้มข้นจะกัดกร่อนโลหะเกือบทุกชนิด เป็นอันตรายแก่อวัยวะของร่างกาย เช่น ตา จมูก ผิวหนัง เมื่อถูกคลอรีนจะอักเสบและบวมพอง ถ้าสูดดมเข้าไปจะเกิดอาการไอแฉะ หายใจไม่สะดวก เจ็บคอ แสบหน้าอก และอาจทำให้เสียชีวิตถ้าสูดดมในปริมาณมากเกินไป

5. กรณีที่ใช้คลอรีนในสระว่ายน้ำในปริมาณเกินมาตรฐานกำหนดคนนอกจากจะทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์แล้วก็ยังสามารถอันตรายต่อผู้ว่ายน้ำได้เหมือนกัน เช่น ระคายเคืองตาและโพรงจมูก กัดกร่อนฟัน หรือกรณีที่หญิงมีครรภ์กินเข้าไปจะทำให้เป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์วัย 5-6 เดือนได้ คือจะทำให้เป็นโรค Hyponatremic seizures ส่งผลให้พิการตั้งแต่กำเนิดได้

6. คลอรีนที่ตกค้างในน้ำจะสามารถเกิดการรวมตัวกันกับสารอื่นแล้วเกิดเป็นสารก่อมะเร็งได้ หรือ ที่เรียกว่า DBP (Disinfection by products) และมีอันตรายอย่างมาก ซึ่งถ้าได้รับสาร DBP ในเวลานานๆ ก็จะทำให้เกิดเป็นมะเร็งได้ โดย DBP จะมีหลายกลุ่ม [70] ดังนี้

ก. กลุ่ม Haloacetic acids ได้แก่ Monochloroacetic acid Dichloroacetic acid, Monobromoacetic acid, Trichloroacetic acid และ Dibromoacetic acid

ข. กลุ่ม TTHM's (Total Trihalomethanes) ได้แก่ Bromodichloromethanes, Tribromomethane, Dibromochloromethane และ Trichloromethane

ค. กลุ่ม Bromate

ง. กลุ่ม Chlorite

ตารางที่ 2.1 ระดับความรุนแรงของแก๊สคลอรีนในปริมาณต่างๆ [49]

ระดับความรุนแรง	ลักษณะอาการ	ความเข้มข้น ( ppm )
ปริมาณความเข้มข้นที่ทำให้รับรู้ได้ว่ามีคลอรีนอยู่	-	0.1-0.3
ความเข้มข้นที่อาจมีได้ในระยะเวลายาวนาน	-	1
เกิดพิษน้อย	น้ำตาไหล ไอ และมีน้ำมูกไหล	2-5
เกิดพิษค่อนข้างมาก	หายใจไม่สะดวก ลืมตาไม่ค่อยขึ้น เจ็บหน้าอก และเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตในเวลา 30 นาที -1 ชม.	5-30
เป็นพิษมาก	หายใจไม่ออก หมดสติ เสียชีวิตภายใน 30 นาที -1 ชม.	30-60
เสียชีวิต	-	1000

### 2.3.10 มาตรฐานทางเคมีของน้ำ

#### 2.3.10.1 มาตรฐานทางเคมีของสระว่ายน้ำ

มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดปริมาณของสารเคมีสำหรับสระว่ายน้ำที่ใช้และยอมรับกันก็คือ มาตรฐานที่กำหนดขึ้นของสถาบันสระว่ายน้ำแห่งชาติ (National Spa and Pool Institute) แต่ก็ขึ้นอยู่กับมาตรฐานทางด้านสาธารณสุขของแต่ละแห่งด้วยดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณภาพน้ำของน้ำในสระว่ายน้ำ [72]

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน (ppm)
1	คลอรีนอิสระ	1.0-3.0
2	คลอรีนรวม	-
3	pH	7.2-7.6
4	Total Alkalinity (เมื่อใช้คลอรีนเหลว แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ และ ลิเทียมไฮโปคลอไรต์)	80-100
5	Total Alkalinity (เมื่อใช้แก๊สคลอรีน ไดคลอโร ไตรคลอโร และ สารประกอบโบรมีน)	100-120
6	ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolve Solid)	1000-1200
7	ความกระด้าง (Calcium Hardness)	200-400
8	กรดไซยานูริก (Cyanuric Acid)	30-50

### 2.3.10.2 มาตรฐานทางเคมีของน้ำประปา

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (ตามข้อเสนอแนะขององค์การอนามัยโลก ปี 2536) [73]

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย (units)	ค่ามาตรฐาน
1	<b>คุณสมบัติทางแบคทีเรีย(Bacteriological quality)</b> - โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total coliform bacteria) - แบคทีเรียชนิด อีโคไล (E.coli)	พบ-ไม่พบ/100 mL พบ-ไม่พบ/100 mL	ไม่พบ/100 mL ไม่พบ/100 mL
2	<b>คุณสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ (Physical and Chemical quality)</b> - สี ปรากฏ (Apperance colour) - ความขุ่น (Turbidity) - รส และ กลิ่น (Taste and odour) - สารหนู (Arsenic) - แคดเมียม (Cadmium) - โครเมียม (Chromium) - ไซยาไนด์ (Cyanide) - ตะกั่ว (Lead) -ปรอท (Mercury) - เซเลเนียม (Selenium) - ฟลูออไรด์ (Fluoride) - คลอไรด์ (Chloride) - ทองแดง (Copper)เหล็ก (Iron) - แมงกานีส (Manganese) - อลูมิเนียม (Aluminium) - โซเดียม (Sodium) - ซัลเฟต (Sulfate) - สังกะสี (Zinc) - ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) - ปริมาณมวลสารที่ละลายทั้งหมด (Total dissolved solids)	True colour unit NTU - mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L mg/L	15 5 ไม่เป็นที่รังเกียจ 0.01 0.003 0.05 0.07 0.01 0.001 0.01 1.5 250 1 0.3 0.1 0.1 200 250 3 1,000

## ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย (units)	ค่ามาตรฐาน
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไนเตรทในรูปไนเตรท (Nitrate as NO<sub>3</sub>-)</li> <li>- ไนไตรท์ในรูปไนไตรท์ (Nitrite as NO<sub>2</sub>-)</li> <li>- คลอรีนอิสระตกค้าง (Free residual chlorine)</li> <li>- เบนซีน (Benzene)</li> <li>- คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)</li> <li>- ไดโครโรมีเทน (Dichloromethane)</li> <li>- หนึ่ง, สอง-ไดโครโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)</li> <li>- เบนโซไพรีน (Benzo[a]pyrene)</li> <li>- ไมโครซิสติน-แอลอาร์ (Microcystin-LR)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mg/L</li> <li>mg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>50</li> <li>3</li> <li>&gt; 0.2</li> <li>10</li> <li>2</li> <li>20</li> <li>30</li> <li>0.7</li> <li>1</li> </ul>
3	<b>สารเคมีที่ใช้ป้องกันและกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- อัลดรินและดิลดริน (Aldrin/Dieldrin)</li> <li>- คลอเดน (Chlordane)</li> <li>- ดีดีที (DDT)</li> <li>- สอง,สี่-ดี (2,4-D)</li> <li>- เฮปตาคลอและเฮปตาคลออีพอกไซด์ (Heptachlor and Heptachlor epoxide)</li> <li>- เฮกซะคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)</li> <li>- ลินแดน (Lindane)</li> <li>- เมททอกซิลคลอ (Methoxychlor)</li> <li>- เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.03</li> <li>0.2</li> <li>2</li> <li>30</li> <li>0.03</li> <li>1</li> <li>2</li> <li>20</li> <li>9</li> </ul>
4	<b>ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) sum of the ratio</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- คลอโรฟอร์ม (Chloroform , CHCl<sub>3</sub>)</li> <li>- โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane , CHBrCl<sub>2</sub>)</li> <li>- ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane , CHBr<sub>2</sub>Cl)</li> <li>- โบรโมฟอร์ม (Bromoform , CHBr<sub>3</sub>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> <li>µg/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1</li> <li>200</li> <li>60</li> <li>100</li> <li>100</li> </ul>
5	<b>กัมมันตภาพรังสี (Radioactive)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ความแรงแรงรังสีแอลฟา (Gross alpha activity)</li> <li>- ความแรงแรงรังสีเบตา (Gross beta activity)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bq/L</li> <li>Bq/L</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.1</li> <li>1</li> </ul>

### 2.3.10.3 มาตรฐานทางเคมีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม [74]

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1	pH	5.5-9.0
2	ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 mg/L - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) ไม่เกิน 2,000 mg/L หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 mg/L
3	สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 mg/L
4	อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 °C
5	สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6	ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
7	ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 mg/L
8	น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 mg/L
9	ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
10	สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
11	สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช หรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด
12	ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 mg/L หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 mg/L

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
13	ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 mg/L
14	ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 mg/L หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่ง รองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่ คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 mg/L
15	โลหะหนัก (Heavy Metal) - สังกะสี (Zn) - โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) - โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium) - ทองแดง (Cu) - แคดเมียม (Cd) - แบเรียม (Ba) - ตะกั่ว (Pb) - นิกเกิล (Ni) - แมงกานีส (Mn) - อาร์เซนิก (As) - เซเลเนียม (Se) - ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 5.0 mg/L ไม่เกิน 0.25 mg/L ไม่เกิน 0.75 mg/L ไม่เกิน 2.0 mg/L ไม่เกิน 0.03 mg/L ไม่เกิน 1.0 mg/L ไม่เกิน 0.2 mg/L ไม่เกิน 1.0 mg/L ไม่เกิน 5.0 mg/L ไม่เกิน 0.25 mg/L ไม่เกิน 0.02 mg/L ไม่เกิน 0.005 mg/L

## 2.4 หลอดตรวจวัด (Detector tube)

หลอดตรวจวัดได้ผลิตขึ้นครั้งแรกที่ประเทศสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1919 [75, 76] เพื่อใช้สำหรับวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสถานประกอบการ (Indoor) โดยหลอดตรวจวัดที่ผลิตขึ้นจะใช้รีเอเจนท์ตรวจวัด (detection reagent) บรรจุลงในท่อแก้วขนาดเล็ก ถ้าในอากาศมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดแล้วเกิดสารที่มีสีทำให้ทราบความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยสีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งจะทราบความเข้มข้นได้จากการนำไปเปรียบเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร สามารถใช้ได้ทั้งในสถานประกอบการและในบรรยากาศทั่วไป (Outdoor)

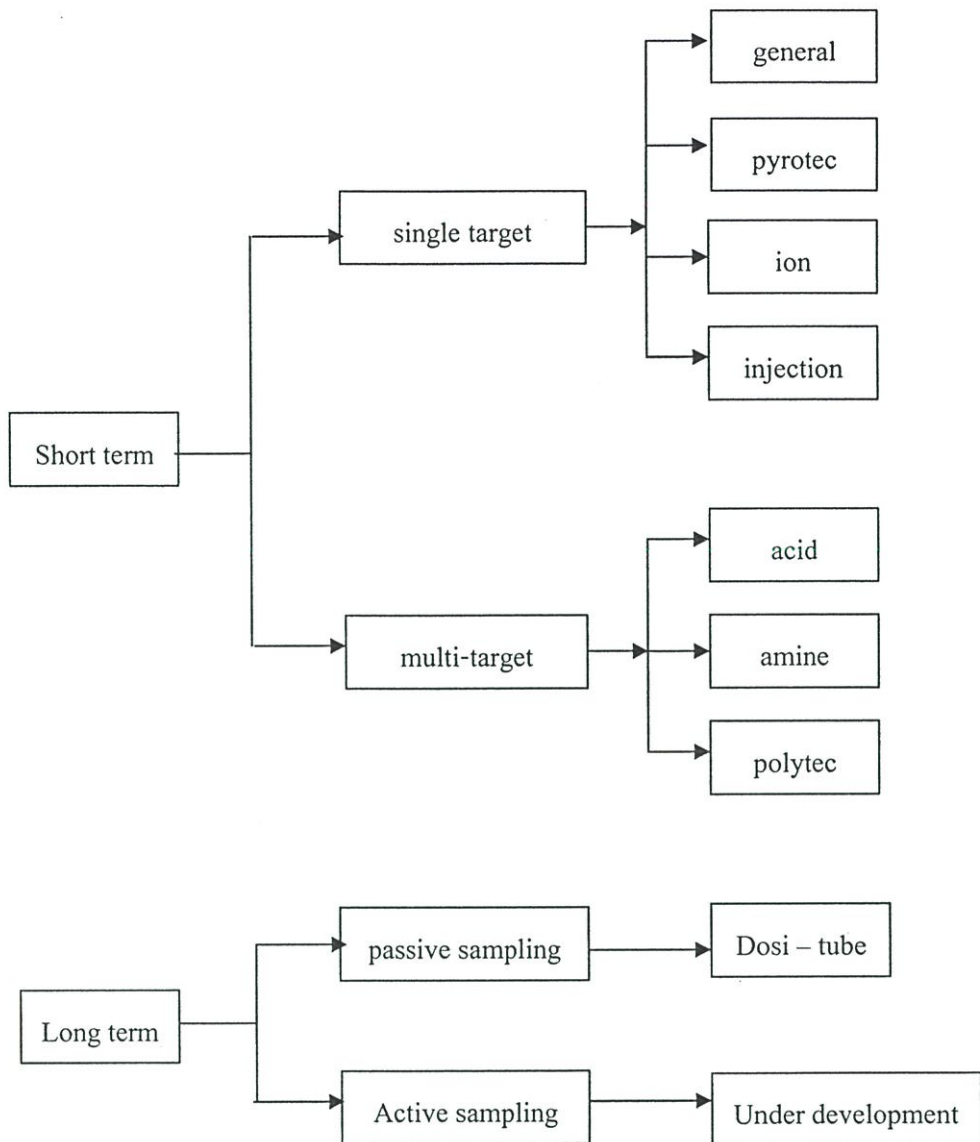
การใช้หลอดตรวจวัดมีข้อได้เปรียบหลายอย่าง เช่นสามารถวิเคราะห์สารแทนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือราคาแพง มีความสลับซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูง แต่ถ้าใช้หลอดตรวจวัดแทนจะลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก และที่สำคัญคือเวลาในการวิเคราะห์ก็ยิ่งน้อยกว่าอีกด้วย

การพัฒนาประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัดนอกจากจะทำให้สามารถวิเคราะห์สารได้เร็ว ใช้งานง่ายแล้วยังลดค่าใช้จ่ายจากการวิเคราะห์ได้อย่างมาก สามารถนำไปใช้งานได้ในสถานที่จริง ตรวจวัดสารได้ในช่วงความเข้มข้นที่กว้าง ปรับปรุงวิธีการตรวจวัดให้มีความถูกต้องแม่นยำได้ยิ่งขึ้น รีเอเจนท์ตรวจวัดก็สามารถเก็บไว้ได้นานมากขึ้น (ประมาณ 3 ปี) และยังสามารถอ่านความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดได้โดยตรงจากสเกลข้างหลอดหรือนำความเข้มของสีที่เปลี่ยนแปลงมาเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร

ในปี ค.ศ. 1970 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาหลอดตรวจวัดให้สามารถอ่านความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลข้างหลอด [75] จึงทำให้ปัจจุบันนี้สามารถอ่านความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดได้เร็ว โดยนำมาเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัดสำหรับวัดมลพิษในน้ำและใต้ดินสำหรับตรวจวัดมลพิษที่บริเวณเขตนิคมอุตสาหกรรมในประเทศแคนาดา

หลอดตรวจวัดที่มีการผลิตขายตามท้องตลาดในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส ซึ่งจะสามารถวัดได้ถึงระดับ ppm ประสิทธิภาพของการตรวจวัดก็เทียบเท่ากับวิธีทางสเปกโทรโฟโตเมทรี และนอกจากนี้แล้วยังสะดวกในการใช้งาน สามารถพกพาไปตรวจวัดได้ โดยไม่ต้องยุ่งยากในการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้แล้วยังใช้เวลาในการตรวจวัดเร็ว ทำให้ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สารตัวอย่างได้อย่างมาก

### 2.4.1 ชนิดของหลอดตรวจวัด [77, 78, 79]



รูปที่ 2.10 ชนิดของหลอดตรวจวัดแบบต่างๆ [80]

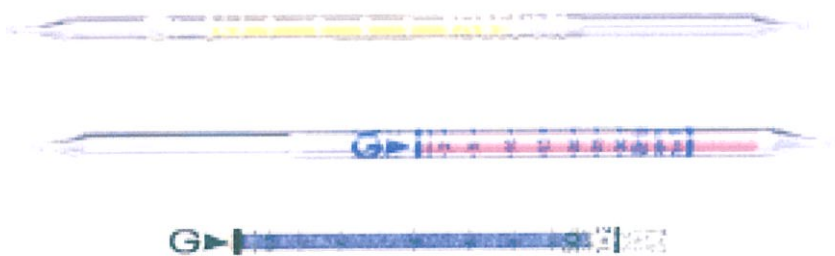
#### 2.4.1.1 Standard Detector Tubes

เป็นหลอดตรวจวัดที่ออกแบบสำหรับปั๊มเก็บตัวอย่าง (Sampling pump) หรือปั๊มมือ เช่น GV-100S ซึ่งสามารถนำตัวอย่างแก๊สเข้าไปในหลอดตรวจวัดได้ 50 หรือ 100 mL การควบคุมคุณภาพของหลอดตรวจวัดจะควบคุมทั้งขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดและประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้บรรจุในหลอด ซึ่งหลอดตรวจวัดส่วนมากจะมีอายุการเก็บไว้ใช้งานประมาณ 3 ปี

หลอดตรวจวัดที่จะผลิตขึ้นในอนาคตจะมีการทำสเกลไว้ข้างหลอด ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถอ่านความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัดได้โดยตรงจากสเกลข้างหลอด ภายในหลอดจะบรรจุด้วยรีเอเจนต์ตรวจวัดที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างได้ง่าย แล้วได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสี ข้อดีของหลอดตรวจวัดคือใช้งานง่าย และรวดเร็ว ในการตรวจวัด เพราะสามารถอ่านความเข้มข้นได้จากระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของรีเอเจนต์ตรวจวัดหลังจากที่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง

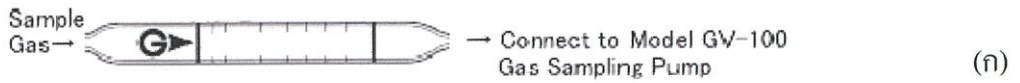
หลอดตรวจวัดจะถูกปิดปลายทั้ง 2 ข้างหลังจากกำหนดสเกลเพื่อป้องกันไม่ให้รีเอเจนต์ตรวจวัดที่บรรจุอยู่ภายในหลอดถูกทำลายหรือทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศ ทำให้การใช้งานง่าย ซึ่งก่อนที่จะนำมาใช้งานจะต้องมีการหักปลายทั้ง 2 ข้าง แล้วก็เสียบหลอดตรวจวัดต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศที่มีแก๊สที่ต้องการตรวจวัดอยู่แล้ว หลังจากนั้นก็ดันตัวอย่างแก๊สเข้าไปในหลอด แก๊สตัวอย่างก็จะไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสี จึงอ่านค่าความเข้มข้นได้จากระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสเกลข้างหลอด หรือเทียบความเข้มของสีกับ Chart ความเข้มข้นของสาร Standard Detector Tubes แสดงดังในรูปที่ 2.11

หลอดตรวจวัดแบบ Standard Detector Tubes อีกชนิดหนึ่ง คือ แบบคู่ (twin tubes) ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษคือจะประกอบด้วยหลอดจำนวน 2 หลอดต่อเข้าด้วยกัน โดยหลอดที่ 1 จะใช้สำหรับตรวจจับแก๊สที่ไม่ต้องการตรวจวัดหรือที่เป็นตัวรบกวนออกก่อน แล้วจะเหลือแก๊สที่ต้องการตรวจวัดผ่านเข้าไปยังหลอดที่ 2 ข้อดีของหลอดตรวจวัดชนิดนี้คือจะไม่มีตัวรบกวนจากสารอื่นเข้ามาทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดนอกจากสารที่ต้องการตรวจวัดเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.12

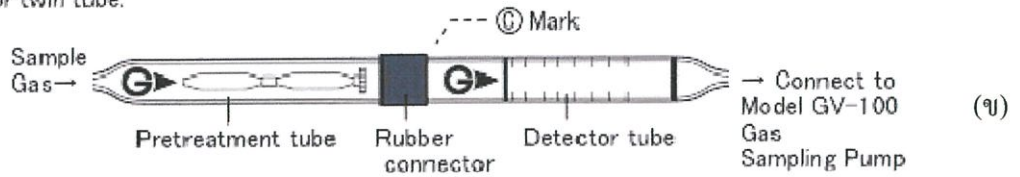


รูปที่ 2.11 Standard Detector Tubes แบบต่างๆ [77, 81]

For single tube:



For twin tube:



รูปที่ 2.12 หลอดตรวจวัดแบบ single tube (ก) และ twin tube (ข) [82, 83]

#### 2.4.1.2 Dosi-Tubes

บางครั้งเรียกหลอดตรวจวัดชนิดนี้ว่า dosimeter tube ซึ่งหลอดตรวจวัดชนิดนี้จะถูกออกแบบเป็นพิเศษเพื่อใช้สำหรับวัดความเข้มข้นเฉลี่ยของสารต่อเวลา (time weight average : TWA) หรือวัดแก๊สในสถานประกอบการโดยอาศัยหลักการแพร่ของแก๊สเข้าไปในหลอดตรวจวัด โดยจะนำ Dosi-tube ไปใส่ใน Dosi-tube holder แล้วจึงนำไปติดตั้งยังบริเวณที่ต้องการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 2.13



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.13 Dosi-Tubes (ก) และ Dosi-tube ที่ถูกใส่ใน Dosi-tube holder (ข) [84]

### 2.4.1.3 Polytec Tubes

หลอดตรวจวัดชนิดนี้จะใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบ GV-100 เพื่อวัดปริมาณของ Unknown ในตัวอย่างที่เป็น simultaneous ปัจจุบันหลอดตรวจวัดชนิดนี้มีทั้งหมด 4 ชนิด การใช้งานจะต้องนำ polytec tube ไปต่อกับ PYROTEC Pyrolyzer และปั๊มสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 Polytec Tubes ที่ต่อเข้ากับ PYROTEC Pyrolyzer และปั๊มสุญญากาศ [85]

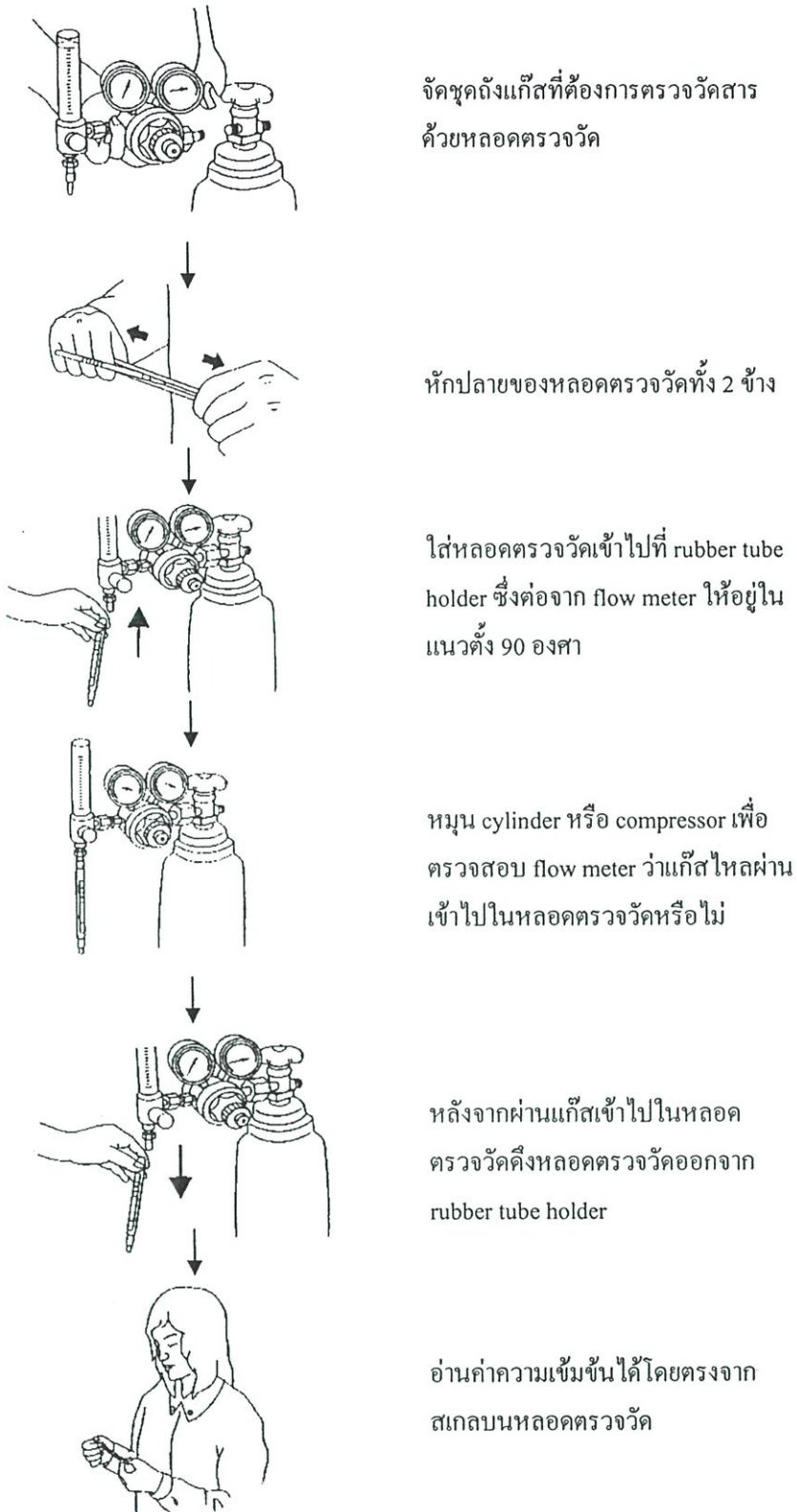
### 2.4.1.4 Breathing Air Tubes

เป็นหลอดตรวจวัดที่ใช้สำหรับตรวจวัดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไออน้ำ และไอน้ำมันในถังออกซิเจนที่ใช้สำหรับการหายใจ หลอดตรวจวัดชนิดนี้ไม่ต้องใช้ปั๊มดูดอากาศดูดสารตัวอย่างเข้าไปในหลอด แต่จะใช้ flow meter และ regulator ปรับให้แก๊สผ่านเข้าไปในหลอด เช่น ระบบ Pulsafe system เมื่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไออน้ำและไอน้ำมันเข้าไปในหลอดก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดที่อยู่ในหลอด ลักษณะของ Breathing Air Tubes แสดงดังรูปที่ 2.15 และวิธีการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.16

นอกจากนี้ Breathing Air Tubes ยังสามารถวัดสารตัวอย่างที่อยู่ในรูปของสารละลายได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย เช่น ซัลไฟด์ไอออนในสารละลาย โดยวิธีการใช้งานก็จะหักปลายทั้ง 2 ข้าง แล้วจึงนำไปจุ่มในสารละลายที่ต้องการวัด และสารตัวอย่างในสารละลายจะเข้าไปในหลอดได้โดยอาศัยแรงดันคาปิลลารี เมื่อสารตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจวัดก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสี จึงอ่านความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้จากสเกลข้างหลอด วิธีการใช้งานแสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.15 Breathing Air Tubes ที่ต่อเข้ากับถังแก๊สเพื่อวัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในถังแก๊ส [86]



รูปที่ 2.16 วิธีการใช้ Breathing Air Tubes [87, 88]

### 2.4.1.5 Injection Measurement Tubes

หลอดตรวจวัดชนิดนี้จะใช้สำหรับตรวจวัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และโพรเพนที่มีความเข้มข้นสูงๆ วิธีการนำสารตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจวัดจะดูดสารเข้าไปในปั๊มแล้วจึงฉีดเข้าไปในหลอดตรวจวัดได้โดยตรง

### 2.5.1.6 Educational Tubes

#### 2.4.2 ลักษณะของหลอดตรวจวัด [89, 90]

2.4.2.1 เป็นหลอดแก้วขนาดเล็กความยาวประมาณ 5-10 cm ภายในหลอดจะบรรจุด้วยรีเอเจนท์ตรวจวัด และบริเวณปลายทั้งสองข้างของหลอดจะถูกปิดเพื่อป้องกันรีเอเจนท์ตรวจวัดที่อยู่ในหลอดถูกทำลายหรือทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อต้องการใช้งานจึงหักปลายทั้ง 2 ข้างแล้วจึงนำไปตรวจวัดสารที่ต้องการได้เลย

2.4.2.2 รีเอเจนท์ตรวจที่บรรจุไว้ในหลอดจะเกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างแล้วได้สารที่มีสีสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีจะบอกถึงความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ส่วนใหญ่จะนำรีเอเจนท์ตรวจวัดมาเคลือบบนซิลิกาแล้วจึงบรรจุลงในหลอดแก้ว

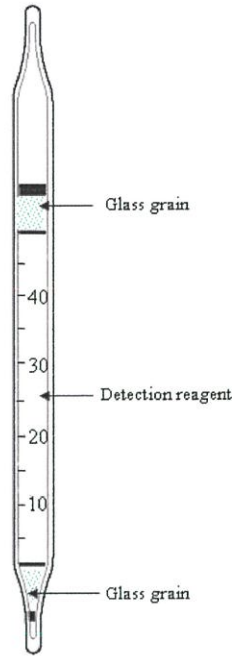
2.4.2.3 Glass grain เป็นส่วนที่ไม่เคลือบด้วยรีเอเจนท์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งส่วนที่ไม่ถูกเคลือบจะไม่มีการทำสเกลไว้

2.4.2.4 บริเวณที่บรรจุด้วยรีเอเจนท์ตรวจวัดจะมีสเกลสำหรับบอกระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีหรือบอกความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด ทำให้อ่านค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้ง่ายยิ่งขึ้น

2.4.2.5 หลอดตรวจวัดจะระบุชนิดของสารที่ต้องการตรวจวัด และระบุช่วงความเข้มข้นที่ต้องการตรวจวัด คือ H สำหรับวัดสารที่มีความเข้มข้นสูง M สำหรับวัดสารที่มีความเข้มข้นปานกลาง และ L สำหรับวัดสารที่มีความเข้มข้นต่ำ

2.4.2.6 QC Number ที่อยู่บนหลอดจะบอกถึงประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัด

2.4.2.7 จำนวนของสโตรก (stroke) เวลาที่รีเอเจนท์ตรวจวัดทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง (sampling time) และเวลาที่น้อยที่สุดที่รีเอเจนท์ตรวจวัดทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง (optimum sampling time) จะขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดตรวจวัด



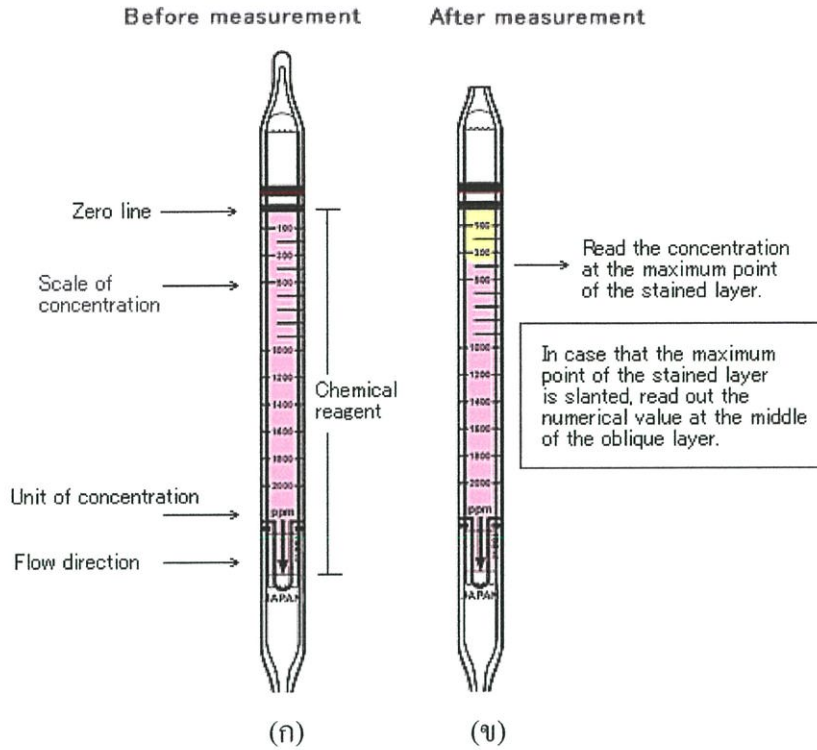
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของหลอดตรวจวัด [91]

#### 2.4.3 การใช้งานหลอดตรวจวัด [75, 92, 93]

การใช้งานหลอดตรวจวัดจะมีวิธีการที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง อุปกรณ์ที่ใช้กับหลอดตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 อุปกรณ์และวิธีการใช้งานหลอดตรวจวัด [90]



รูปที่ 2.19 หลอดตรวจวัดก่อนใช้งาน (ก) เปรียบเทียบกับหลังใช้งาน (ข) [94]

#### 2.4.3.1 วิธีการนำสารตัวอย่างแก๊สเข้าไปในหลอดตรวจวัด [75, 92]

การนำสารตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจวัดสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับว่าสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจวัดมีลักษณะแบบใด ดังต่อไปนี้

1. **Vacuum method** เป็นวิธีที่นิยมใช้กับสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส โดยจะดูดแก๊สตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจวัดด้วยปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยขั้นตอนการตรวจวัดแก๊สด้วยวิธี Vacuum method [90, 94] คือ

ก. ตรวจสอบการทำงานของปั๊มว่าอยู่ในสภาพดีและไม่รั่ว โดยนำหลอดตรวจวัดที่ยังไม่ได้ตัดปลายใส่ไว้ที่ปากกระบอกสูบ ดึงก้านกระบอกสูบออกให้สุดแล้วล๊อคไว้ 1 นาที ปลดล๊อคให้ก้านกระบอกสูบกลับที่เดิมถ้าลูกสูบวิ่งกลับไปตำแหน่งเดิม แสดงว่าปั๊มสุญญากาศไม่รั่ว

ข. นำหลอดตรวจวัดในข้อ ก. มาตัดปลายทั้ง 2 ข้างโดยใส่ในช่องสำหรับตัดปลายหลอดตรวจวัดที่อยู่ข้างกระบอกสูบ

ค. ใส่หลอดตรวจวัดที่ตัดปลายแล้วไว้ที่ปากกระบอกสูบ ให้ลูกศรที่ข้างหลอดตรวจวัดชี้เข้าทางกระบอกสูบ

ง. ดันก้านกระบอกสูบให้สุดเพื่อไม่ให้มีอากาศค้างอยู่ภายในกระบอกสูบ แล้วดึงก้านกระบอกสูบออกเพื่อนำอากาศเข้า สามารถนำอากาศเข้าเพียงครึ่งกระบอกสูบ (50 mL) หรือนำอากาศเข้าเต็มกระบอกสูบ (100 mL) จึงถือคั้งไว้ 1 นาทีหรือนานพอที่จะให้อากาศผ่านหลอดตรวจวัดเข้ามาในกระบอกสูบจนเต็ม

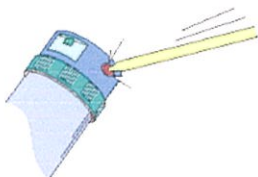
จ. อ่านความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด โดยดูจากแถบสีที่เกิดขึ้นว่าตรงกับ ความเข้มข้นเท่าใด วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.20

ฉ. เมื่อสารที่ต้องการตรวจวัดมีความเข้มข้นน้อยมาก ควรใช้ปริมาณอากาศจำนวนมากขึ้น โดยการเก็บตัวอย่างอากาศเข้ากระบอกสูบหลายๆ ครั้งดึงก้านกระบอกสูบ 1 ครั้ง หมุน Counter Ring ทวนเข็มนาฬิกา 1 ครั้ง Counter Ring จะบอกจำนวนครั้งทั้งหมดที่ป้อนอากาศเข้าเรียกว่า สโตรก (stroke) นำจำนวนครั้งที่ป้อนอากาศเข้าหารค่าความเข้มข้นที่อ่านจากสเกลข้างหลอดแก้วจะได้ค่าความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด

ช. การเก็บตัวอย่างจะเก็บในช่วงอุณหภูมิ 0-40 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 20-90 % ไม่ต้องปรับค่าความเข้มข้นที่อ่านจากสเกลข้างหลอดตรวจวัดหรือถ้าสารเคมีที่บรรจุภายในหลอดมีความไวต่ออุณหภูมิหรือความชื้น ให้ปรับค่าความเข้มข้นที่อ่านได้โดยใช้ตารางความสัมพัทธ์ที่ฉลากของหลอดตรวจวัด



หลอดตรวจวัดที่ยังไม่ได้ใช้งาน



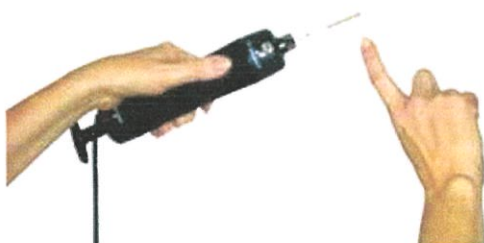
หักปลายของหลอดตรวจวัดทั้ง 2 ข้าง



เสียบหลอดตรวจวัดเข้า  
ไปนํ้าสูญญากาศ



ตั้งก้านกระบอกสูบออกเพื่อนํ้าอากาศ  
เข้า แล้วล็อคไว้ เพื่อให้ตัวอย่างแก๊สทำ  
ปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัด



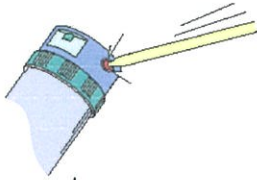
อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจาก  
สเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.20 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Vacuum method [95, 96]

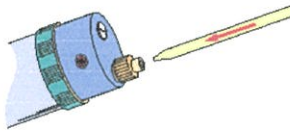
2. Injection method ใช้กับตัวอย่างแก๊สบางชนิด ซึ่งจะดูดแก๊สเข้าไปใน syringe แล้วจึงฉีดเข้าไปในหลอดตรวจวัด วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.21



หลอดตรวจวัดที่ยังไม่ได้ใช้งาน



หักปลายของหลอดตรวจวัดทั้ง 2 ข้าง



เสียบหลอดตรวจวัดเข้าไปในปั๊ม  
สุญญากาศซึ่งมีสารตัวอย่างอยู่ข้าง  
ในแล้ว



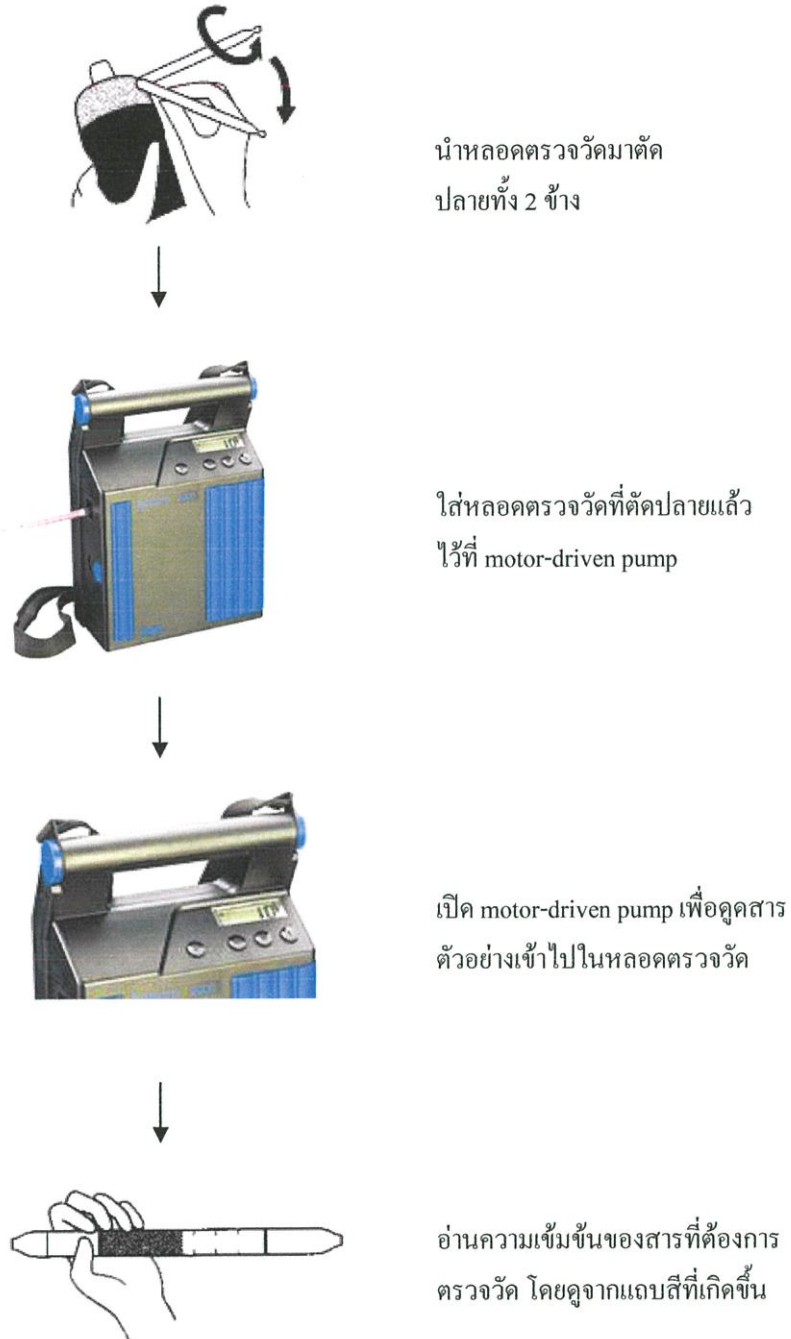
ดันสารตัวอย่างที่มีอยู่ในปั๊มสุญญากาศ  
เข้าไปในหลอดตรวจวัด



อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจาก  
สเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.21 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Injection method [95]

3. **Motor-driven pump method** จะมีการดูดเก็บตัวอย่างด้วย motor driven pump ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของหลอดตรวจวัด วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.22

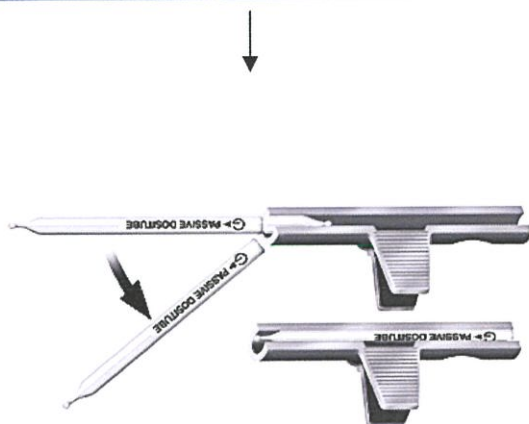


รูปที่ 2.22 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Motor-driven pump method [97]

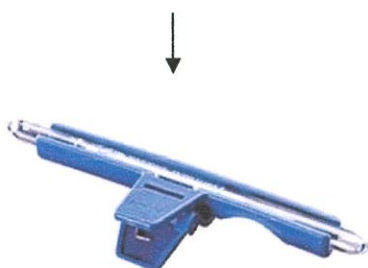
4. Diffusion method จะปล่อยให้แก๊สแพร่เข้าไปในหลอดโดยตรง โดยไม่มีการดูดตัวอย่างแก๊สเข้าไปในหลอดตรวจวัด วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.23



ใส่หลอดตรวจวัดเข้าไปใน tube holder



หักปลายของหลอด



นำหลอดตรวจวัดไปวางไว้ในบริเวณที่ต้องการตรวจวัดสาร แล้วปล่อยให้แก๊สตัวอย่างแพร่เข้าไปในหลอดตรวจวัด



อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

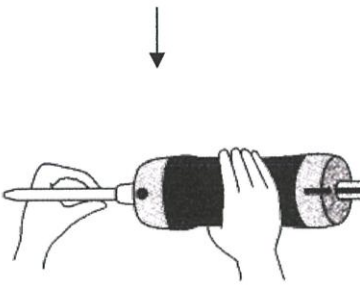
รูปที่ 2.23 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Diffusion method [98, 99]

### 2.4.3.2 วิธีการนำสารตัวอย่างที่อยู่ในของสารละลายหรือตัวอย่างแก๊สที่อยู่ในดินเข้าไปในหลอดตรวจวัด [75, 100]

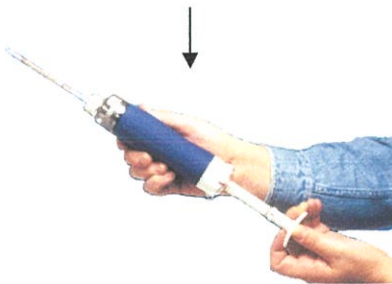
1. **Boring method** เจาะหลุมเข้าไปในพื้นดินแล้วใช้ปั๊มดูดเอาไอของสารตัวอย่างที่อยู่สถานะแก๊สเข้ามาอยู่ในปั๊มสุญญากาศ



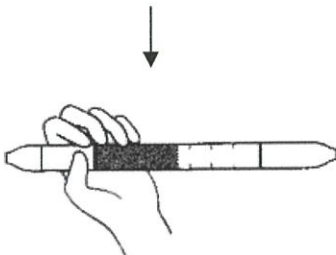
เจาะหลุมลงไปดินแล้วใช้ปั๊มดูดเอาไอของสารตัวอย่างที่อยู่สถานะแก๊สเข้ามาอยู่ในปั๊มสุญญากาศ



ใส่หลอดตรวจวัดที่ตัดปลายแล้วไว้ที่ปากกระบอกสูบ ให้ลูกศรที่ข้างหลอดแก้วชี้เข้ากระบอกสูบ



ดันสารตัวอย่างที่มีอยู่ในปั๊มสุญญากาศเข้าไปในหลอดตรวจวัด



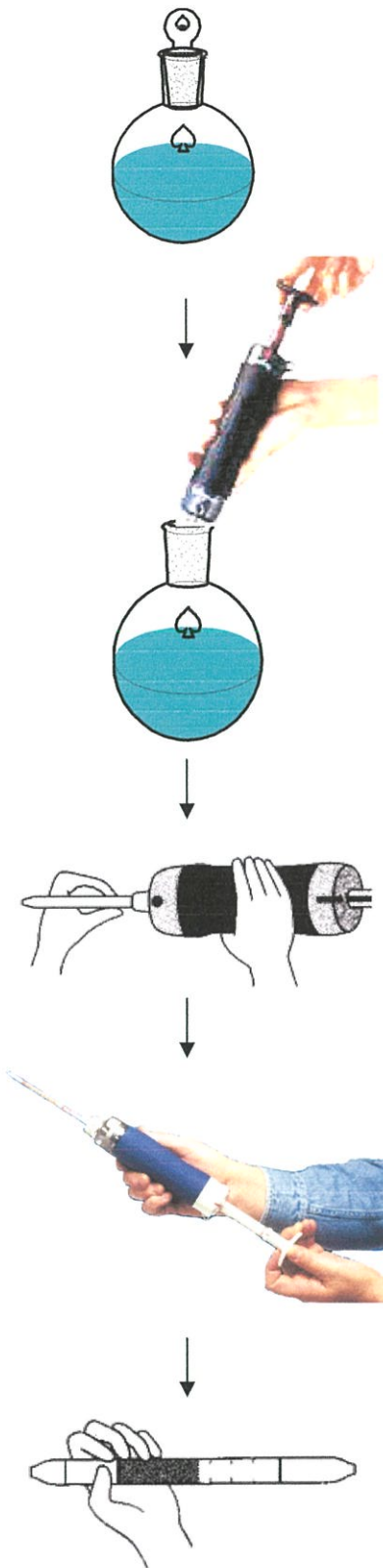
อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.24 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Boring method [95, 97, 101]

**2. Reagent adding method** จะมีการเติมรีเอเจนต์เข้าไปในตัวอย่างเพื่อเปลี่ยนให้เป็นแก๊สที่สามารถตรวจวัดได้ง่าย แล้วหลังจากนั้นจึงเก็บตัวอย่างแก๊สที่ได้ด้วยปั๊มสุญญากาศ แล้วจึงนำมาฉีดเข้าหลอดตรวจวัด วิธีนี้จะใช้กับตัวอย่างที่เป็นสลัดจ์ (sludge) หรือน้ำเสีย แต่มีข้อเสียคืออาจจะเกิดตัวรบกวนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดเหมือนสารตัวอย่างทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของรีเอเจนต์ตรวจวัด หรือวัดความเข้มข้นได้มากกว่าความเป็นจริง วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.25

**3. Vapor-liquid equilibrium method** วิธีนี้จะใช้กับสารตัวอย่างที่อยู่ในของเหลวที่ตรวจวัดได้ยาก หลักการคือ เมื่อมีการนำสารละลายไปวางไว้ในภาชนะปลายปิดแล้วก็จะทำให้สารละลายเกิดการระเหยและแพร่จนกระทั่งไอของสารละลายอยู่ในภาวะสมดุล (equilibrium ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารละลายแต่ละชนิด จึงเก็บไอที่อยู่ในภาวะสมดุลนี้ไปตรวจวัด โดยดูดไอเข้าไปในหลอดตรวจวัดด้วยปั๊มสุญญากาศ วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.26 และอ่านค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างจากหลอดตรวจวัด วิธีการอ่านความเข้มข้นสามารถอ่านได้ 2 แบบ คือ

- ก. multiply the reading จะอาศัยแฟกเตอร์เฉพาะของสารตัวอย่าง
- ข. correct the reading จะอาศัยข้อมูลของตัวอย่างจากกราฟ



เติมรีเอเจนท์เข้าไปในสารตัวอย่างจนได้  
สารผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

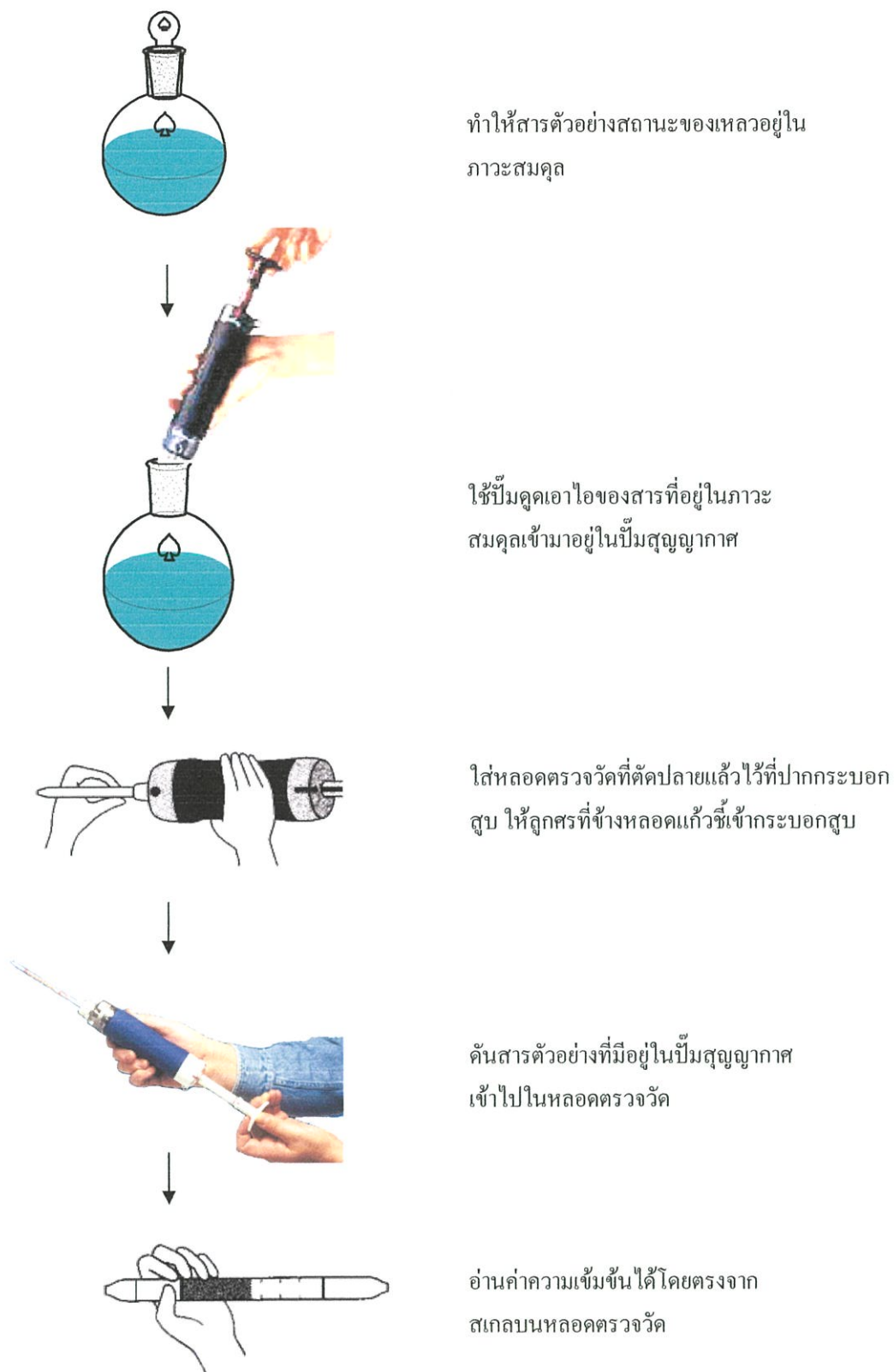
ใช้ปั๊มดูดเอาไอของสารที่เป็นแก๊สเข้ามา  
อยู่ในปั๊มสุญญากาศ

ใส่หลอดตรวจวัดที่ตัดปลายแล้วไว้ที่ปากกระบอก  
สูบ ให้ลูกศรที่ข้างหลอดแก้วชี้เข้ากระบอกสูบ

ดันสารตัวอย่างที่มีอยู่ในปั๊มสุญญากาศ  
เข้าไปในหลอดตรวจวัด

อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจาก  
สเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.25 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Reagent adding method [95, 97]



รูปที่ 2.26 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Vapor-liquid equilibrium method [95, 97]

**4. Capillary method** วิธีนี้จะอาศัยหลักการของแรงดันคาпилลารี (capillary action) เพื่อค้นสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวให้เข้าไปในหลอดแก้วแคบๆ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยวิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.27



**รูปที่ 2.27** วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Capillary method [95, 102]

#### 2.4.4 วิธีการปรับเทียบหลอดตรวจวัด (Calibration gas generation method) [75, 100]

วิธีการปรับเทียบหลอดตรวจวัด มีหลายวิธี โดยจะพิจารณาทั้งคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) คุณสมบัติทางเคมี (chemical properties) และความเข้มข้นของแก๊ส วิธีการปรับเทียบหลอดตรวจวัดสามารถทำได้ดังนี้

#### 2.4.4.1 Permeation tube method [103, 104]

Permeation tube เป็นท่อพลาสติกปลายปิด ซึ่งภายในจะบรรจุด้วยแก๊สเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูง มีจุดเดือด  $-70-50^{\circ}\text{C}$  ( $-94-104^{\circ}\text{F}$ ) และมีความเสถียรสูง

#### 2.4.4.2 Diffusion tube method [105]

Diffusion tube เป็นหลอดแก้วที่ภายในประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นของเหลว (liquid container portion) และส่วนที่มีการแพร่ (diffusion portion) ของเหลวที่บรรจุเข้าไปในหลอดต้องมีความบริสุทธิ์สูงและใส่เข้าไปในหลอดด้วยเข็มแบบแก้ว (glass syringe) โดยของเหลวที่ใช้จะต้องมีความดันไอในช่วง  $5-400\text{ mmHg}$  ที่  $25^{\circ}\text{C}$  ( $77-122^{\circ}\text{F}$ ) และต้องมีความเสถียรสูง ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิกับหลอดของเหลวก็จะกลายเป็นไอและมีการแพร่เกิดขึ้น

#### 2.4.4.3 Dynamic dilution method

วิธีนี้จะอาศัยอัตราการไหลของแก๊สจะทำให้แก๊สที่เข้มข้นเกิดการเจือจาง และต้องควบคุมอัตราการไหลให้ต่อเนื่อง

#### 2.4.4.4 Static dilution method

วิธีนี้จะนำแก๊สหรือของเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูงมาบรรจุอยู่ในอุปกรณ์สำหรับบรรจุแก๊สซึ่งมีความจุ 20 L หรือมากกว่า และเจือจางด้วยอากาศหรือแก๊สไนโตรเจน ก็จะทำให้ทราบความเข้มข้นของแก๊สที่ต้องการ

#### 2.4.4.5 High pressure gas cylinder method

แก๊สที่จะนำมาปรับเทียบ (calibration gas) จะถูกทำให้อยู่ในสถานะที่มีความดันสูงภายในภาชนะบรรจุ ซึ่งจะเทียบกับ Japanese Industrial Standard JIS K 0007

### 2.4.5 การทำประกันคุณภาพ (Quality assurance) หลอดตรวจวัด [75, 100]

เพื่อให้หลอดตรวจวัดมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูงจะต้องทำการประกันคุณภาพของหลอดตรวจวัด โดยต้องมีการวางแผนและพัฒนาทั้งในส่วนของการผลิตและกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ มีทั้งหมด 4 วิธี ดังนี้

#### 2.4.5.1 การวางแผนและการพัฒนา

การพัฒนาคุณภาพของหลอดตรวจวัด ต้องมีความระมัดระวังในหลายๆ ส่วน เช่น สารที่ต้องการตรวจวัด ช่วงความเข้มข้นของการวัด และวัตถุประสงค์ของการตรวจวัด ในการพัฒนาหลอดตรวจวัดจะเน้นช่วงของการเปลี่ยนแปลงสี คือ สามารถวัดสารได้ในช่วงความเข้มข้นที่กว้างขึ้น

#### 2.4.5.2 การเพิ่มเสถียรภาพของรีเอเจนต์ตรวจวัด

รีเอเจนต์ตรวจวัดที่ใช้จะบอกถึงประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัด เสถียรภาพของรีเอเจนต์ตรวจวัดจะแสดงถึงระยะเวลาการเก็บหลอดตรวจวัดที่สามารถเก็บไว้ใช้งานได้ยาวนานเพียงใด ยิ่งถ้ารีเอเจนต์ตรวจวัดมีเสถียรภาพสูงก็หมายความว่าสามารถเก็บหลอดตรวจวัดไว้ได้นาน โดยในปัจจุบันนี้สามารถเก็บหลอดตรวจวัดไว้ได้นานถึง 3 ปี

#### 2.4.5.3 ปรับปรุงความแม่นยำ (Accuracy) ในการวัด

ข้อดีของการใช้หลอดตรวจวัดคือสามารถตรวจวัดปริมาณสารได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของหลอดตรวจวัดเช่น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอด ความต้านทานของรีเอเจนต์และอนุภาคที่บรรจุภายในหลอดต่อสารตัวอย่างที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ภายในหลอด

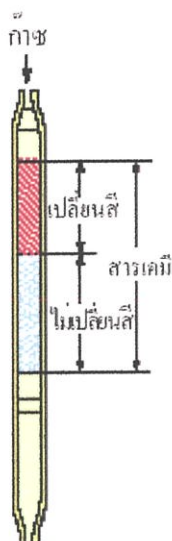
#### 2.4.5.4 การปรับเทียบสเกล (calibration scale)

การปรับเทียบสเกลของหลอดตรวจวัดก็เหมือนกับการทำ Sampling standard gas ความเข้มข้นของสารตัวอย่างจะมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี การปรับเทียบสเกลของหลอดตรวจวัดจะเป็นการตรวจสอบเพื่อรับประกันว่าหลอดตรวจวัดที่ผลิตขึ้นมีประสิทธิภาพมากน้อยแค่ไหน ดังนั้นความถูกต้องของการปรับเทียบสเกล จะบ่งบอกความถูกต้องของหลอดตรวจวัดด้วย

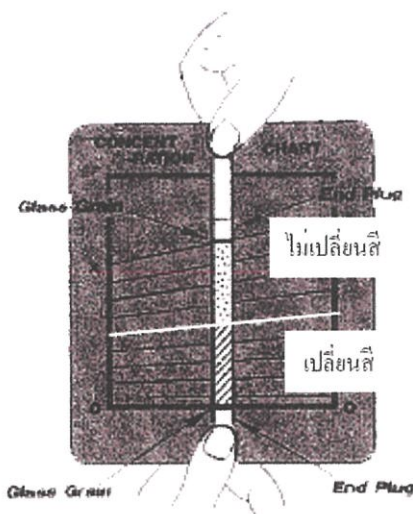
### 2.4.6 การวิเคราะห์และแปรข้อมูล [106]

#### 2.4.6.1 วิธีการอ่านค่าความเข้มข้นของสาร [90]

ความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดจะอ่านได้โดยตรงจากความยาวของสีที่เปลี่ยนแปลงไปภายในหลอด ซึ่งสามารถอ่านความเข้มข้นของสารตัวอย่างได้ 2 วิธี คือ อ่านจากสเกลของหลอดโดยตรงดังแสดงในรูปที่ 2.28ก หรืออ่านโดยเปรียบเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสารดังแสดงในรูปที่ 2.28ข



(ก)



(ข)

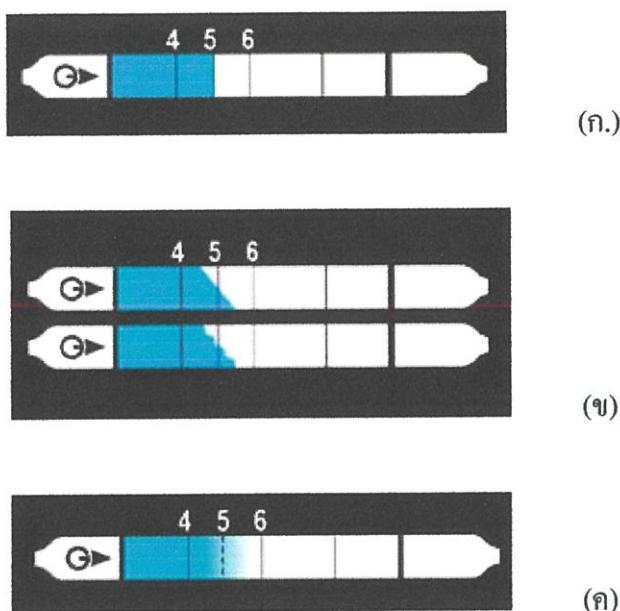
**รูปที่ 2.28** การอ่านค่าความเข้มข้นของสารด้วยวิธีการอ่านจากสเกลของหลอดโดยตรง (ก) และอ่านโดยเปรียบเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร (ข) [90]

สำหรับการอ่านค่าโดยตรงจากสเกล [106] ในบางครั้งลักษณะการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดจะเกิดได้หลายแบบซึ่งจะมีวิธีการอ่านค่าได้แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.29 ดังนี้

1. แถบที่เกิดการเปลี่ยนสีที่มีลักษณะเรียงดังแสดงในรูปที่ 2.29ก จะอ่านค่าความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดตรงสเกลบริเวณสุดท้ายของการเปลี่ยนสีได้เลย เช่นจากรูปที่ 2.29ก จะอ่านค่าความเข้มข้นของสารได้เท่ากับ 5%

2. แถบที่เกิดการเปลี่ยนสีที่มีลักษณะเอียงดังแสดงในรูปที่ 2.29ข จะอ่านค่าความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดตรงสเกลบริเวณกลางของแถบที่เกิดการเปลี่ยนสี เช่นจากรูปที่ 2.29ข จะอ่านค่าความเข้มข้นของสารได้เท่ากับ 5%

3. แถบที่เกิดการเปลี่ยนสีมีลักษณะไม่ชัดเจนหรือสีไม่เข้มดังแสดงในรูปที่ 2.29ค จะอ่านค่าความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดตรงสเกลบริเวณกลางของแถบที่เกิดการเปลี่ยนสีระหว่างส่วนที่เข้มและไม่เข้ม เช่นจากรูปที่ 2.29ค จะอ่านค่าความเข้มข้นของสารได้เท่ากับ 5%



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดในลักษณะต่างๆ [106, 107]

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการวัดความเข้มข้นของแก๊สด้วยหลอดตรวจวัดสามารถบอกความเข้มข้นของแก๊ส ณ ช่วงเวลานั้นได้อย่างคร่าวๆ โดยจะหาได้จากความเข้มข้นของแก๊สที่อ่านได้จากหลอดตรวจวัดต่อปริมาตรอากาศที่ดูดเข้าไป

#### 2.4.6.2 การปรับช่วงของการวัด [90]

การใช้งานหลอดตรวจวัดถ้าใส่สารตัวอย่างน้อยเกินไปจะทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือไม่เห็นสีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวอย่างและรีเอเจนต์ตรวจวัดได้ชัดเจน ซึ่งก็หมายความว่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่เข้าไปในหลอดตรวจวัดไม่ได้อยู่ในช่วงของสเกลบนหลอด (calibration scale) สามารถแก้ไขได้โดย

1. เมื่อไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้นหลังจากที่นำสารตัวอย่างเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดในหลอด ให้ใส่สารตัวอย่างเพิ่มเข้าไปในกระบอกสูบอีกจนกระทั่งเห็นการเปลี่ยนแปลงของสี โดยจำนวนครั้งทั้งหมดที่ป้อนอากาศเข้าไปในกระบอกสูบ เรียกว่าสโตรก การอ่านค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างจะทำได้โดยนำจำนวนของสโตรกไปหารค่าความเข้มข้นที่อ่านได้จากสเกลข้างหลอดตรวจวัดก็จะได้ค่าความเข้มข้นจริงของสารตัวอย่าง เช่น ถ้าใช้จำนวนของสโตรกทั้งหมด 5 ครั้งก็ให้นำความเข้มข้นที่อ่านได้มาหารด้วย 5 ก็จะได้ความเข้มข้นที่แท้จริงของสารตัวอย่าง
2. เมื่อสีที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าช่วงของสเกลบนหลอด ให้ใช้หลอดตรวจวัดอันใหม่แล้วก็ลดจำนวนของสโตรก เช่น ถ้าจำนวนของสโตรก 1 ครั้งใช้ 100 mL ก็อาจจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งหรือ

ลดลงตามความเหมาะสม แล้วนำจำนวนของสโตรกที่ลดมากคูณกับความเข้มข้นที่อ่านได้ เช่น ถ้าจำนวนของ 1 สโตรกเท่ากับ 100 mL แล้วลดลงเหลือ 50 mL ให้นำ 2 มาคูณกับความเข้มข้นของค่าที่อ่านได้ก็จะทราบความเข้มข้นที่แท้จริงของสารตัวอย่าง

## 2.4.7 ลักษณะของความแม่นยำที่ใช้ในหลอดตรวจวัด [75, 100]

### 2.4.7.1 Random error

ถ้าสารตัวอย่างมีความเข้มข้นสูงจะทำให้ความแม่นยำของการตรวจวัดลดลง ความผิดพลาดแบบนี้เรียกว่า random error ซึ่งความผิดพลาดแบบนี้จะเกิดจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดที่ไม่เท่ากัน ความหนาแน่นของรีเอเจนต์ตรวจวัด ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนต์ตรวจวัด หรือผู้ใช้งาน ค่า random error จะมีความสัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่อ่านได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เรียกค่านี้ว่า coefficient of variation (CV) ดังแสดงในสมการที่ 2.26

$$\text{Relative standard deviation (CV)} = \frac{\text{Standard deviation } (\sigma)}{\text{Mean value}} \times 100 \quad 2.26$$

### 2.4.7.2 Systematic error

เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากปฏิกิริยาสุญญากาศ ซึ่งเป็นความผิดพลาดของการปรับเทียบหลอดตรวจวัด ระยะเวลาที่ปล่อยให้สารตัวอย่างทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัด เวลาในการเก็บหลอดตรวจวัด หรือตัวรบกวน

## 2.4.8 ปัจจัยที่มีผลต่อความผิดพลาดของการตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัด [75, 100]

### 2.4.8.1 ตัวรบกวน (Interference)

หลักการเกิดปฏิกิริยาของตัวรบกวนคือถ้าสารที่นำเข้าหลอดตรวจวัดมีหลายชนิดและมีคุณสมบัติคล้ายกับสารตัวอย่าง สารนั้นก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดได้เหมือนกับสารตัวอย่างส่งผลให้ความเข้มข้นที่อ่านได้มีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เรียกสารชนิดนี้ว่าตัวรบกวน อิทธิพลของตัวรบกวนจะขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดภายในหลอดตรวจวัดมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ

**1. Direct reaction** ตัวรบกวนจะสามารถทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดได้โดยตรงเหมือนกับสารตัวอย่าง จึงทำให้ความเข้มข้นของสารที่อ่านได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เช่น ตัวรบกวนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ คือ ไฮโดรเจนไซยาไนด์ ถ้าค่า pH ภายในหลอดเป็นกรดหรือเป็นเบสจะทำให้

รีเอเจนต์ตรวจวัดที่บรรจุภายในหลอดสามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นตัวรบกวนได้โดยตรง จึงทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

**2. Compound reaction** ตัวรบกวนที่เข้าไปในหลอดตรวจวัดจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับรีเอเจนต์ตรวจวัดหลายชนิดที่อยู่ภายในหลอด ถ้าตัวรบกวนที่ถูกนำเข้าไปในหลอดเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดแบบ primary reaction ก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับสารตัวอย่าง จึงทำให้ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เช่น ตัวรบกวนของเตตระคลอโรเอทีลีน คือ ไตรคลอโรเอทีลีน

**3. Two – step reactions** รีเอเจนต์ตรวจวัดที่บรรจุภายในหลอดตรวจวัดจะถูกออกซิไดส์ก่อนด้วยตัวรบกวน หรือสารที่เป็นตัวออกซิไดส์ (pretreatment reagent) จะถูกตัวรบกวนทำลายทำให้ความสามารถในการออกซิไดส์ลดลง มีผลให้ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง เช่น ตัวรบกวนของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนคือไตรคลอโรเอทีลีน

#### 2.4.8.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานหลอดตรวจวัดจะต้องอยู่ในช่วง 0–40 °C (32–104 °F) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้หลอดตรวจวัดคือ 20°C (68°F) และควรจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง  $20 \pm 10$  °C จึงจะทำให้ความผิดพลาดในการวัดน้อยที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6 เป็นความผิดพลาดของการตรวจวัดที่เกิดจากอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.5 การตรวจวัด 1,1,1-Trichloroethane ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน [75, 100]

อุณหภูมิ	Correction factor
0 °C (32 °F)	1.4
10 °C (50 °F)	1.3
20 °C (68 °F)	1.0
30 °C (86 °F)	0.8
40 °C (104 °F)	0.65

ตารางที่ 2.6 การตรวจวัด Tetrachloethylene ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ กัน [75, 100]

ความเข้มข้นจริง ของสารตัวอย่าง (ppm)	ความเข้มข้นของค่าที่อ่านได้จากหลอดตรวจวัด (ppm)				
	0 °C (32 °F)	10 °C (50 °F)	20 °C (68 °F)	30 °C (86 °F)	40 °C (104 °F)
100	410	155	100	80	65
80	310	125	80	65	50
60	210	95	60	50	40
40	130	60	40	35	25
20	55	30	20	17	15
10	20	13	10	8	7
5	8	6	5	4	3

### 2.4.8.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการดูดการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ของหลอดตรวจวัด บางชนิด เช่น

#### 1. อิทธิพลของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ก. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนต์ตรวจวัดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C (68 °F) สารตัวอย่างบางชนิดจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดได้เร็ว แต่จะค่อยๆ เกิดปฏิกิริยาทำให้ระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้นและความเข้มของสีน้อยลง ส่งผลให้ค่าที่วัดได้สูงกว่าความเป็นจริง

ข. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างกับรีเอเจนต์ตรวจวัด

เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 20 °C (68 °F) อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตัวอย่างและรีเอเจนต์ตรวจวัดจะเพิ่มขึ้น ทำให้ให้ระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีลดลงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงทำให้ค่าความเข้มข้นของสารที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

#### 2. อิทธิพลของการดูดซับทางกายภาพ

ปริมาณการดูดซับทางกายภาพของสารต่อรีเอเจนต์ตรวจวัดจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสารบางส่วนจะเกิดการดูดซับทางกายภาพกับรีเอเจนต์ตรวจวัดก่อนแล้วจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดได้ และจะไม่เกิดปฏิกิริยาตามปกติ (normal reaction) เป็นสาเหตุให้ระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ปริมาณของสารที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนในกรณีที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้สารเกิดการดูดซับทางกายภาพได้น้อย ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของสารที่วัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

### 3. อุณหภูมิของหลอดตรวจวัดและอุณหภูมิของสารตัวอย่าง

อุณหภูมิของสารตัวอย่างจะมีผลต่อการตรวจวัดสารเหมือนกับอุณหภูมิของหลอดตรวจวัด ความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิจะเกิดจากการที่เก็บหลอดตรวจวัดไว้ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นควรที่จะเก็บหลอดตรวจวัดที่อุณหภูมิต่ำๆ

#### 2.4.8.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความชื้น

หลอดตรวจวัดที่ผลิตขึ้นในทางการค้าส่วนมากจะทำการปรับเทียบสเกลที่ความชื้นที่ 50 % และจะสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงความชื้น 99 % โดยที่จะไม่มีผลกระทบต่อ การตรวจวัดสาร นอกจากนี้การควบแน่นของน้ำในอากาศและปริมาณของไอน้ำในอากาศที่ต่ำก็ไม่มีผลต่อการตรวจวัดสารเหมือนกัน

หลอดตรวจของบริษัท Gastec ที่ความชื้นมีผลต่อการตรวจวัด มีทั้งหมด 5 ชนิด คือ หลอดตรวจวัดกรดไนตริก ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ไฮโดรซัน คลอโรฟอร์ม และ เมทิลีนคลอไรด์ โดยที่หลอดตรวจวัดกรดไนตริก ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ ไฮโดรซันจะปรับเทียบสเกลที่ความชื้น 50 % ส่วนหลอดตรวจวัดคลอโรฟอร์ม และ เมทิลีนคลอไรด์ จะปรับเทียบสเกลที่ความชื้น 10 % เมื่อนำหลอดตรวจวัดดังกล่าวทั้ง 5 ชนิดมาใช้งานที่ความชื้นที่ไม่ได้ปรับเทียบสเกลก็จะมีผลต่อการตรวจวัดสารได้ ทำให้ค่าที่ตรวจวัดได้มีค่าแตกต่างจากความเป็นจริง

#### 2.4.8.5 ความผิดพลาดเนื่องจากความดันบรรยากาศ

ความดันบรรยากาศจะมีผลต่อความเข้มข้นของแก๊ส ซึ่งหลอดตรวจวัดของบริษัท Gastec จะทำการปรับเทียบสเกลที่ความดันบรรยากาศปกติ (760 mmHg) และจะต้องใช้งานที่ความดันในช่วง  $\pm 10\%$  ของความดันบรรยากาศปกติ (684 – 836 mmHg) เท่านั้น ถ้าใช้งานนอกช่วงของความดันบรรยากาศดังกล่าวก็จะมีผลต่อความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดได้ ดังต่อไปนี้

$$\text{Tube concentration} = \frac{\text{Tube reading} \times 1013 \text{ (hPa)}}{\text{Atmospheric pressure (hPa)}} \quad 2.27$$

หรือ

$$\text{Tube concentration} = \frac{\text{Tube reading} \times 760 \text{ (mmHg)}}{\text{Atmospheric pressure (hPa)}} \quad 2.28$$

## 2.4.9 ข้อควรระวังในการใช้หลอดตรวจวัด [90]

2.4.9.1 การเลือกใช้หลอดตรวจวัดจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ต้องการตรวจวัด และช่วงความเข้มข้นของสารนั้นๆ

2.4.9.2 การดูแลปั๊มหลังการใช้งานควรเช็ดทำความสะอาดให้แห้งและเก็บโดยหลีกเลี่ยงการถูกฝน ถูกแดด และความชื้น

## 2.4.10 ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแก๊สด้วยหลอดตรวจวัด

การตรวจวัดแก๊สโดยใช้หลอดตรวจวัดจะต้องมีการจัดหาอุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างแก๊ส เช่น ปั๊มซึ่งมีหลายแบบ ได้แก่ ปั๊มสุญญากาศ ปั๊มอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งมีราคาประมาณ 20,000-30,000 บาท ขึ้นไป ส่วนหลอดตรวจวัดจะขายเป็นชุด บรรจุชุดละประมาณ 5-10 หลอด โดยราคาจะอยู่ในช่วงประมาณ 4,000 บาทขึ้นไป

## 2.4.11 การเก็บรักษาหลอดตรวจวัด [108]

หลอดตรวจวัดบางชนิดจะใช้รีเอเจนต์ตรวจวัดที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและรีเอเจนต์บางชนิดก็สามารถจะเกิดการสลายตัวได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการเก็บรักษาให้ถูกต้อง เพื่อไม่ให้รีเอเจนต์ตรวจวัดที่อยู่ในหลอดตรวจวัดถูกทำลาย การเก็บหลอดตรวจวัดจะเก็บที่อุณหภูมิที่เย็น (0-10 °C หรือ 32-50 °F) และเก็บในที่ที่ไม่มีแสง แต่ในปัจจุบันนี้หลอดตรวจวัดบางชนิดก็สามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องได้

## 2.4.12 การกำจัดหลอดตรวจวัด [108]

หลอดตรวจวัดที่หมดอายุหรือผ่านการใช้งานแล้วควรจะต้องมีการกำจัดอย่างเหมาะสมและถูกวิธีตามคำแนะนำของบริษัทที่ผลิต

## 2.4.13 การประยุกต์ใช้งานหลอดตรวจวัด [109]

หลอดตรวจวัดสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางเช่น

2.4.13.1 ด้านความปลอดภัย (Safety) ใช้ตรวจวัดปริมาณสารที่อันตรายในบรรยากาศหรือวัดปริมาณแก๊สพิษในบริเวณที่มีการจราจรหนาแน่น

2.4.13.2 ด้านอุตสาหกรรม (Industrial) วัดปริมาณของสารอันตรายที่เกิดจากกระบวนการผลิตหรือที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมของโรงงานอุตสาหกรรม

2.4.13.3 ด้านสถานประกอบการ (Indoor air) ใช้ตรวจวัดปริมาณสารที่อันตรายในอากาศในสถานประกอบการ

2.4.13.4 ด้านมลพิษทางอากาศ (Air pollution) วัดปริมาณสารพิษในบรรยากาศ เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์

2.4.13.5 ด้านน้ำ (Water) วัดสารในน้ำ เช่น น้ำประปา น้ำเสีย น้ำตามแม่น้ำลำคลอง หรือน้ำใต้ดิน

2.4.13.6 ด้านดิน (Soil) ตรวจวัดมลพิษในดิน

2.4.13.7 ระบบท่อ (Pipelines) เช่นตรวจวัดกำมะถันในท่อน้ำมัน วัดปริมาณของคลอรีนในระบบท่อน้ำประปา

2.4.13.8 Unknown ในน้ำเสีย (Unknown waste)

2.4.13.9 ด้านอื่นๆ

#### 2.4.14 ข้อดีของหลอดตรวจวัด [90]

2.4.14.1 ใช้งานง่ายเพราะสามารถพกพาติดตัวไปตรวจวัดนอกห้องปฏิบัติการได้ทุกสถานที่และทุกเวลาและนอกจากนี้เวลาในการตรวจวัดก็น้อยคือไม่เกิน 10 นาที บางชนิดใช้เวลาตรวจวัดแค่ 1-2 นาที เท่านั้นเอง

2.4.14.2 อ่านผลการตรวจวัดง่าย โดยจะอ่านสีที่เปลี่ยนแปลงจากสเกลบนหลอดตรวจวัดได้เลย

2.4.14.3 สามารถวัดความเข้มข้นตั้งแต่ระดับต่ำๆ (ppm) จนถึงความเข้มข้นสูงๆ ได้

2.4.14.4 ค่าความถูกต้องสูง

2.4.14.5 สามารถเก็บหลอดตรวจวัดไว้ใช้งานได้ยาวนานถึง 3 ปี

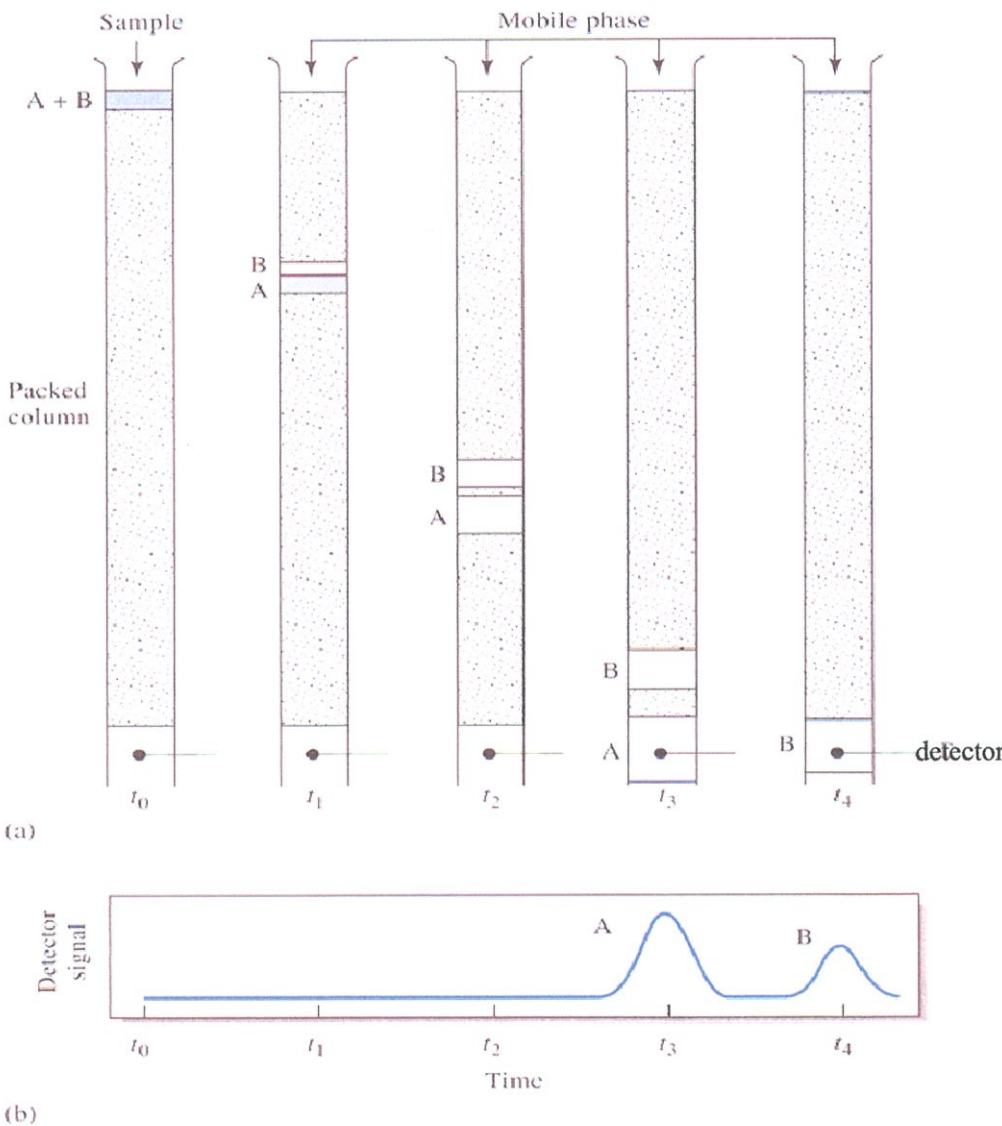
ในกรณีหลอดตรวจวัดสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมผลิตขายมากนัก เพราะยังไม่มีการศึกษาและพัฒนาอย่างจริงจัง ดังนั้นผู้ทำงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาหลอดตรวจวัดขึ้น เพื่อให้ได้หลอดตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

## 2.5 ทฤษฎีโครมาโทกราฟีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

### 2.5.1 หลักการของโครมาโทกราฟี

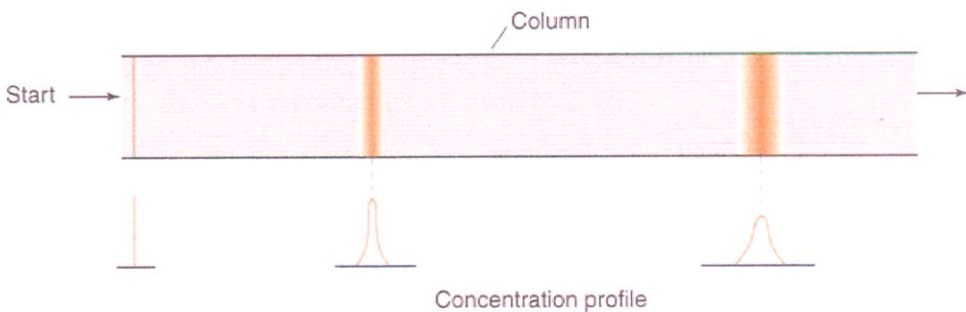
โครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสาร (Separation) ที่สามารถวิเคราะห์ทั้งในด้านคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis) และปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) ซึ่งจะอาศัยอัตราการเคลื่อนที่ของสารที่แตกต่างกันในการแยกระหว่างเฟสสองเฟส คือ เฟสที่อยู่กับที่ (Stationary Phase) และเฟสที่เคลื่อนที่ (Mobile Phase) นอกจากนี้ยังมีการนำโครมาโทกราฟีมาใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นเช่น การเตรียมสารให้บริสุทธิ์ การศึกษาปฏิกิริยาเคมีต่างๆ และหาค่าคงที่ต่างๆ ทางกายภาพและเคมี (Physicochemistry) เช่น ค่าเสถียรคงที่ของสารเชิงซ้อน เอนทัลปี (Enthalpy) เอนโทรปี (Entropy) และฟรีเอนเนอร์ยี (Free Energy) [110, 111]

หลักการของโครมาโทกราฟีคือจะอาศัยความสามารถในการกระจายตัวหรือการเคลื่อนที่ของสารระหว่างเฟสที่อยู่กับที่ (ตัวดูดซับ) กับเฟสเคลื่อนที่ (ตัวทำละลายที่ผ่านเข้าไปในเฟสที่อยู่กับที่) ซึ่งถ้าสารใดเคลื่อนที่ได้เร็ว (ถูกแยกออกก่อน) แสดงว่าถูกดูดซับที่เฟสที่อยู่กับที่ได้น้อย แต่ถ้าสารใดเคลื่อนที่ได้ช้า (ถูกแยกออกทีหลัง) แสดงว่าถูกดูดซับที่เฟสที่อยู่กับที่ได้มาก ดังแสดงในรูปที่ 2.30 มีสาร A กับสาร B ผสมกันอยู่ สาร A ถูกดูดซับที่เฟสที่อยู่กับที่ได้น้อย จึงเคลื่อนที่ได้เร็วและถูกแยกออกมา ก่อน ส่วนสาร B ถูกดูดซับที่เฟสที่อยู่กับที่ได้มากจึงเคลื่อนที่ได้ช้าและถูกแยกออกทีหลัง [113, 114]



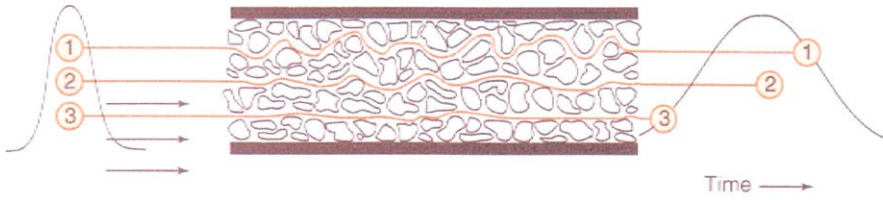
รูปที่ 2.30 การแยกสาร A ออกจาก สาร B โดยอาศัยหลักการทางโครมาโทกราฟี [113]

ความแตกต่างระหว่างอัตราการเคลื่อนที่หรือการกระจายตัวของสาร (Differential Migration) จะเกิดจากสมดุลของการกระจายตัวของสารชนิดต่างๆ (Equilibrium Distribution) ระหว่างทั้งสองเฟส การที่สารจะกระจายตัวได้ดีกว่าในเฟสใดนั้น จะขึ้นกับแรงหน่วงของโมเลกุลของสาร (Molecular Force) กับเฟสทั้งสอง คือ ถ้าสารมีแรงหน่วงเหนี่ยวกับเฟสที่อยู่กับที่มากกว่าจะทำให้ถูกแยกออกมาทีหลัง แต่ถ้าสารใดมีแรงหน่วงเหนี่ยวกับเฟสเคลื่อนที่ได้ดีกว่าก็จะถูกแยกออกมาก่อน กลไกของการหน่วงเหนี่ยวนั้นจะเกิดจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารตัวอย่างกับโมเลกุลของสารในแต่ละเฟส เช่น Ionic Force, Polar Force, Dispersive Force หรือ Chemical Force ตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายตัวของสารในเฟสทั้งสอง คือ องค์กรประกอบของเฟสเคลื่อนที่ องค์กรประกอบของเฟสอยู่กับที่ และอุณหภูมิของการทดลอง [14, 114]



รูปที่ 2.31 การแพร่กระจายของโมเลกุลของสารไปในคอลัมน์ [14]

การแพร่กระจายของโมเลกุลของสารจะไม่สามารถควบคุมให้โมเลกุลของสารชนิดเดียวกันแพร่ไปพร้อมกันได้ ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของสารที่กระจายไปในคอลัมน์จะอยู่ในลักษณะแคบๆ และค่อยๆ ขยายกว้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.31 เนื่องจากอัตราการกระจายตัวหรืออัตราการเคลื่อนที่จะไม่เท่ากันซึ่งความแตกต่างระหว่างอัตราการเคลื่อนที่ของสารชนิดเดียวกันที่ไม่เท่ากันนี้ไม่ได้เกิดจากความแตกต่างของสมดุลการกระจายของสาร แต่เกิดจากกระบวนการทางกายภาพ (Physical Process หรือ Rate Process) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดพีคหรือแบนด์ที่กว้างขึ้น [14]



รูปที่ 2.32 อัตราการกระจายตัวหรืออัตราการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของสารชนิดเดียวกันซึ่งเกิดจากกระบวนการทางกายภาพ [115]

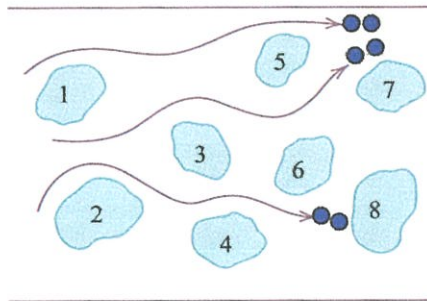
## 2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการแยก [117]

### 2.5.2.1 Initial band width

เกิดจากการที่สารตัวอย่างเข้าไปในคอลัมน์ไม่พร้อมกัน โดยที่สารตัวอย่างจะเข้าไปในลักษณะที่เป็นแถบกว้างเล็กน้อย ซึ่งความกว้างของแถบเริ่มต้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความกว้างของพีคของสารที่ถูกพาออกจากคอลัมน์ ถ้าความกว้างของแถบเริ่มต้นกว้างก็จะทำให้พีคของสารที่ถูกพาออกจากคอลัมน์ (Eluted band) กว้างขึ้นด้วย

### 2.5.2.2 Eddy diffusion

เกิดจากความแตกต่างของกระแสการไหลของเฟสเคลื่อนที่เคลื่อนผ่านช่องทางของเฟสอยู่กับที่ในระยะทางที่ต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.33 ทำให้โมเลกุลของสารชนิดเดียวกันเคลื่อนที่ไปกับเฟสเคลื่อนที่ในช่องทางที่ต่างกัน แต่ก็ขึ้นอยู่กับว่าโมเลกุลนั้นๆ อยู่ในทิศทางไหนของเฟสเคลื่อนที่เพราะภายในคอลัมน์ (เฟสที่อยู่กับที่) มีช่องทางให้โมเลกุลผ่านได้หลายทาง ซึ่งช่องทางเหล่านี้จะมีระยะทางที่ไม่เท่ากัน ถ้าโมเลกุลใดเคลื่อนที่ผ่านช่องทางที่ระยะยาวก็จะออกมาทีหลัง แต่ถ้าโมเลกุลใดเคลื่อนที่ผ่านช่องทางที่สั้นกว่าก็จะออกมาก่อน จึงเป็นผลให้แถบหรือแบนด์กว้างขึ้น



รูปที่ 2.33 การเกิด Eddy diffusion ในคอลัมน์ [14]

โดยการเกิด Eddy diffusion จะมีผลทำให้โมเลกุลของสารกระจายเพิ่มขึ้นจากตอนเริ่มต้นคือ ทำให้แถบสุดท้าย (Final band width) กว้างขึ้น เมื่อมีการไหลของเฟสเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์จะทำให้การกระจายของโมเลกุลของสารจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

การกระจายตัวของแถบ โมเลกุลของสารจะขึ้นอยู่กับขนาดและความสม่ำเสมอของอนุภาคของวัสดุที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (packing material) แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วของการไหลของเฟสเคลื่อนที่

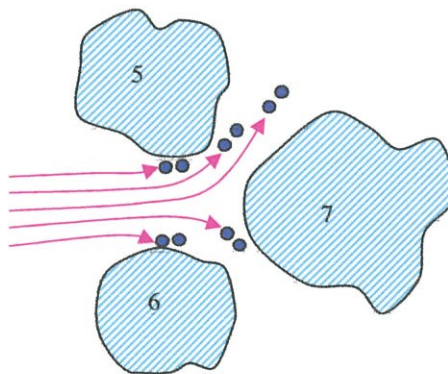
การลดการกระจายของแถบ โมเลกุลของสารจาก Eddy diffusion จะสามารถทำได้โดยใช้วัสดุบรรจุในคอลัมน์ให้มีอนุภาคขนาดเล็ก สม่ำเสมอและควรเป็นชนิด Spherical จะดีกว่า Irregular เพราะจะทำให้การบรรจุวัสดุในคอลัมน์สม่ำเสมอกว่า

### 2.5.2.3 Mass transfer

เกิดจากการกระจายตัวที่ไม่สมดุล (Non equilibrium) ของโมเลกุลของสารระหว่างเฟสทั้งสอง คือ บางโมเลกุลของสารจะใช้เวลาอยู่ในเฟสใดเฟสหนึ่งนานกว่าอีกเฟสหนึ่ง โดยบางโมเลกุลจะเคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วเฉลี่ย และบางโมเลกุลจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุล จึงเกิดการกระจายของแถบของโมเลกุลของสาร มีผลทำให้พีคกว้างขึ้น ซึ่ง Mass Transfer จะเกิดได้จากหลายสาเหตุ คือ

#### 1. Mobile phase mass transfer

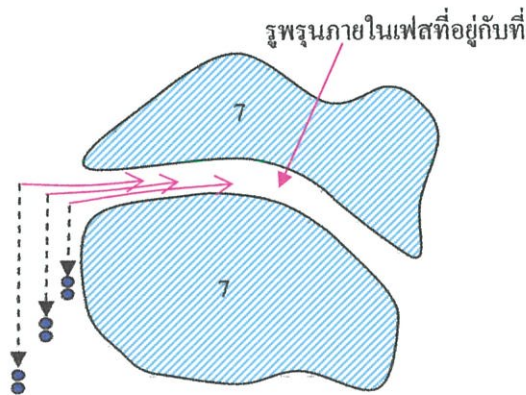
เกิดจากการแสการไหลของเฟสเคลื่อนที่ไหลผ่านไปรอบๆ อนุภาคของเฟสที่อยู่กับที่ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน คือ ส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่อยู่แนบกับเฟสอยู่กับที่จะไหลหรือเคลื่อนที่ช้ากว่าส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่อยู่ตรงกลางของการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าเฟสเคลื่อนที่ไหลบริเวณตรงกลางช่องว่างระหว่างอนุภาคจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่ไหลใกล้ๆ กับพื้นผิวของอนุภาค



รูปที่ 2.34 การเกิด Mobile Phase Mass Transfer [117]

## 2. Stagnant mobile phase mass transfer

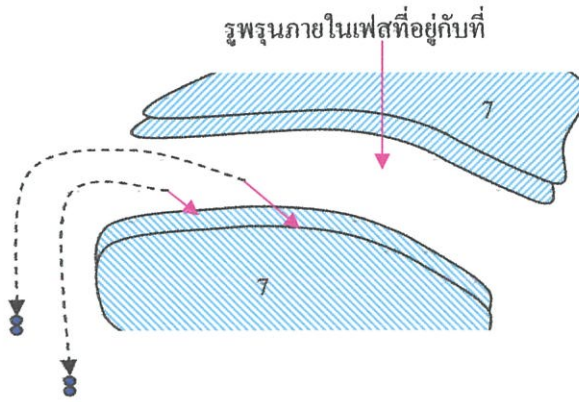
เกิดจากการที่เฟสเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในรูพรุนของอนุภาคของเฟสที่อยู่กับที่ (ในกรณีที่ใช้วัสดุที่มีรูพรุน) บาง โมเลกุลของเฟสเคลื่อนที่จะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนนี้ด้วย การเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน โดยการแพร่ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนผ่านคอลัมน์ได้ช้ากว่า โมเลกุลที่อยู่นอกรูพรุน จะทำให้เกิดการกระจายของแถบ โมเลกุลของสารเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.35 จะเห็นว่าที่รูพรุนของอนุภาคที่ 7 เฟสเคลื่อนที่ที่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ และถ้าแพร่บริเวณที่ไม่ลึกลับก็จะเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วกว่า และส่วนที่แพร่เข้าไปในบริเวณที่ลึกลับจะเคลื่อนที่ออกมาได้ช้ากว่า



รูปที่ 2.35 การเกิด Stagnant mobile phase mass transfer [117]

## 3. Stationary phase mass transfer

เกิดจากความแตกต่างของอัตราเร็วของ โมเลกุลของสารที่เคลื่อนเข้าไปในเฟสที่อยู่กับที่ และหลังจากที่เกิดการแพร่แล้วยังสามารถแทรกซึม (Penetrate) เข้าไปในอนุภาคของเฟสที่อยู่กับที่ได้อีกด้วย หรืออาจจะเข้าไปเกิดอันตรกิริยา (Interaction) แบบใดแบบหนึ่งได้ด้วย ถ้าโมเลกุลใดแทรกซึมเข้าไปลึกลับก็จะติดอยู่กับเฟสที่อยู่กับที่ได้นาน แต่ถ้าโมเลกุลใดที่แทรกซึมเข้าไปไม่ลึกลับก็จะเคลื่อนที่ออกมาก่อน ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.36 จะเห็นว่าที่รูพรุนของอนุภาคที่ 7 นอกจากเฟสเคลื่อนที่ที่จะแพร่เข้าไปในรูพรุนได้แล้วยังเกิดการแทรกซึมเข้าไปในอนุภาคได้อีกด้วย และถ้าแทรกซึมเข้าไปในบริเวณที่ไม่ลึกลับก็จะเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วกว่า และส่วนที่แทรกซึมเข้าไปในบริเวณที่ลึกลับจะเคลื่อนที่ออกมาได้ช้ากว่า



รูปที่ 2.36 การเกิด Stationary phase mass transfer [117]

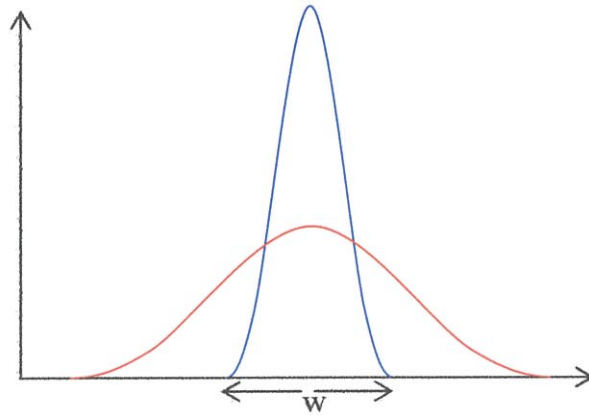
การลด Mass transfer สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของการเคลื่อนที่ออกจากเฟสอยู่กับที่ ดังต่อไปนี้

1. ลดอนุภาควัสดุที่บรรจุให้เล็กลงเพื่อลดช่องว่างในคอลัมน์
2. เลือกเฟสเคลื่อนที่ที่มีการกระจายตัวสูง และมีอัตราการไหลช้าๆ เพื่อลดการกระจายตัวที่ไม่สมดุล
3. ทำให้กระบวนการการเข้าและออกจากเฟสอยู่กับที่เกิดเร็วขึ้น
4. เคลือบอนุภาคของเฟสอยู่กับที่ให้บางลง

#### 2.5.2.4 Longitudinal diffusion

เกิดจากการแพร่กระจายตัวของโมเลกุลในระหว่างการแยกจากส่วนที่มีความเข้มข้นสูงไปยังส่วนที่มีความเข้มข้นต่ำในทุกทิศทาง รวมทั้งอยู่ทางด้านหน้าและด้านหลังของ Band Center ซึ่งการแพร่นี้จะเกิดทั้งในเฟสอยู่กับที่และเฟสเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการกระจายของสารไปตามคอลัมน์ จึงทำให้เกิดแบนด์ที่กว้างขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.37 สามารถแก้ไข Longitudinal diffusion ได้ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มอัตราการไหลของเฟสเคลื่อนที่ เพื่อลดเวลาของสารตัวอย่างที่จะอยู่ในคอลัมน์
2. เลือกเฟสเคลื่อนที่ที่มีการกระจายตัวต่ำ
3. เลือกใช้วัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กและสม่ำเสมอในการบรรจุลงในคอลัมน์



รูปที่ 2.37 การเกิด Longitudinal diffusion [116]

### 2.5.3 Partition ratio (Partition Coefficient, K)

เป็นค่าคงที่ที่ใช้อธิบายถึงสมดุลของการกระจายตัวของสารตัวอย่างระหว่างเฟสที่อยู่กับที่และเฟสเคลื่อนที่

โมเลกุลของสารตัวอย่างที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในคอลัมน์ (Column) จะเกิดการกระจายระหว่างทั้ง 2 เฟส ดังแสดงในสมการที่ 2.29 โดยจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution constant หรือ Partition Coefficient ;  $K_c$ ) และเมื่อการกระจายถึงจุดสมดุล ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่อยู่ในทั้งสองเฟสจะเป็นไปตามสมการที่ 2.30

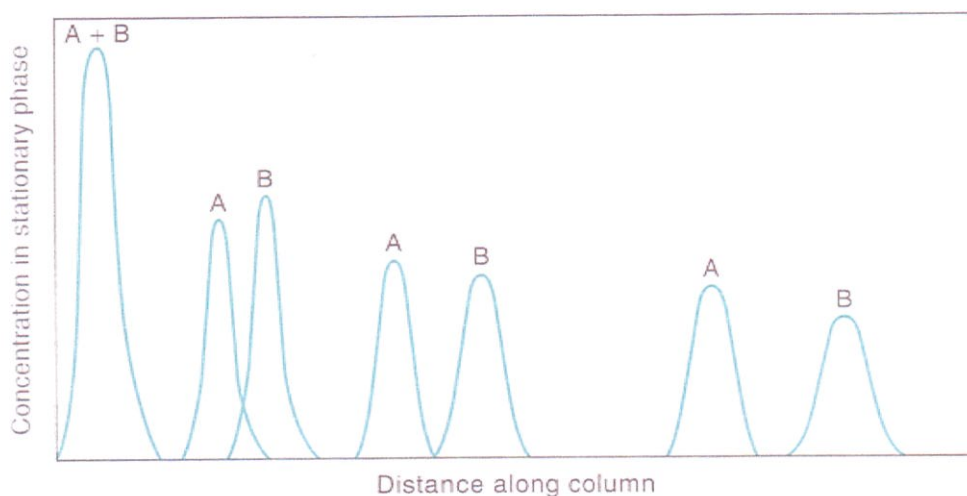


$$K_c = \frac{[X]_s}{[X]_m} \quad (2.30)$$

เมื่อ	$X_s$	=	สารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสที่อยู่กับที่
	$X_m$	=	สารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสเคลื่อนที่
	$[X]_s$	=	ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสที่อยู่กับที่
	$[X]_m$	=	ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสเคลื่อนที่

โดยที่ค่า  $K_c$  จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของสารตัวอย่างตามเฟสเคลื่อนที่ ในขณะที่ทำการเคลเวลลอป (Development) คือเมื่อค่า  $K_c$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วในการ

เคลื่อนที่ของสารตัวอย่างลดลง (สารตัวอย่างจะชอบอยู่ที่เฟสที่อยู่กับที่มากกว่า) ซึ่งก็หมายความว่าถ้า สารตัวอย่างมีค่า  $K_c$  ต่างกันก็จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันได้ การแยกจะแสดงดังรูปที่ 2.38 ซึ่ง สาร A ที่ผสมอยู่กับสาร B และถูกแยกออกจากกันเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่ต่างกัน จาก รูปที่ 2.38 จะเห็นว่าสาร A มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสูงกว่าสาร B จึงถูกแยกออกมาทีหลัง [117, 118]



รูปที่ 2.38 สาร A และ B ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่ต่างกันจึงทำให้ถูกแยกออกจากกันได้ [117]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.Jedsadapattarakul [119] เตรียมซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแคลบข้าว เพื่อใช้เป็นของแข็ง ยึดเกาะ (solid support) ของเฟสอยู่กับที่สำหรับคอลัมน์ GC และ HPLC ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 % (w/v) ได้สารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ปรับ pH เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายกรด ไฮโดรคลอริก 15 % (v/v) จะได้เจลของซิลิกา นำเจลไปทำให้แห้งด้วยเครื่องฟั่นแห้ง จะได้ผงซิลิกาที่สามารถนำมาทำเฟสอยู่กับที่สำหรับคอลัมน์ GC และ HPLC ที่มีราคาถูกว่าราคาตามท้องตลาด

มีศักดิ์ มินินทวิสมัย และ สีหนาด ชาญณรงค์ [120] ประยุกต์ใช้หลอดตรวจวัดที่ออกแบบ สำหรับวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยในอากาศมาใช้ในการตรวจสอบและวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหย ที่แทรกซึมอยู่ในดินเพื่อหาแนวทางในการป้องกัน กำไรและควบคุมการกระจายตัวของสารอินทรีย์ ระเหยในดิน โดยพัฒนาระบบการเก็บตัวอย่างไอของสารอินทรีย์ระเหยในดินที่ระดับความลึก 1 m

หลังจากนำอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นไปใช้ตรวจสอบโรงงานที่ใช้สาร TCE จำนวน 3 โรงงาน พบว่าสามารถตรวจสอบหาบริเวณที่มีการปนเปื้อนสาร TCE ในดินได้อย่างถูกต้อง

ภควดี สุทธิไวยกิจ [121] ได้ผลิตหลอดตรวจวัดปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ โดยดูดอากาศผ่านหลอดตรวจวัดด้วยความเร็วคงที่ แล้ววัดความยาวของสีที่เปลี่ยนจากสีม่วงไปเป็นสีส้ม ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับตารางจะสามารถคำนวณปริมาณของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ โดยประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากโรงงานหรือตรวจติดตามซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในสิ่งแวดล้อม หลอดตรวจวัดที่ผลิตขึ้นมีข้อดีคือใช้ง่าย ทราบปริมาณความเข้มข้นของสารได้ ณ จุดที่เก็บตัวอย่าง และมีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 80 ppm :7.21 % ชัดจำกัดของการตรวจวัด (สามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เท่ากับ 1.24 ppm

Vladimír Pitschmann และคณะ [122] ได้ผลิตหลอดตรวจวัดปริมาณของคลอรีนในอากาศ ซึ่งภายในหลอดตรวจวัดจะบรรจุด้วยซิลิกาที่เคลือบด้วยรีเอเจนต์ตรวจวัด 2 ชนิดคือ 4-aminoantipyrine และ N-(1-naphthyl)ethylenediamine dihydrochloride โดยทำให้รีเอเจนต์ตรวจวัดคงตัวด้วยโซเดียมและไตรเอทิลีนไกลคอล (triethylene glycol) สามารถตรวจวัดคลอรีนในอากาศได้ในช่วงความเข้มข้น 15 – 150 mg/m<sup>3</sup> และเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ตรวจวัดแล้วจะได้สารสีน้ำเงินม่วง

Y. Tanaka และคณะ [123] ศึกษาการตรวจวัดกลิ่นในอากาศโดยใช้หลอดตรวจวัดต่อกับ A4-size optical scanner ทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเมทิลเมอแคพแทน (methyl mercaptan) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) และโพรพานอลดีไฮด์ (propionaldehyde) ได้เท่ากับ 29, 19 และ 46 ppb ตามลำดับ จากการศึกษพบว่า การนำหลอดตรวจวัดมาต่อกับ A4-size optical scanner ทำให้ประสิทธิภาพของการตรวจวัดดีกว่าการใช้หลอดตรวจวัดอย่างเดียวถึง 10 เท่า

I-Fang Mao และคณะ [124] ศึกษาส่วนประกอบของกลิ่นที่เกิดขึ้นจากการทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหารในประเทศไต้หวัน ด้วยเทคนิค olfactometry, gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) และหลอดตรวจวัด สามารถหาปริมาณและส่วนประกอบของกลิ่นที่ได้จากการทำปุ๋ยหมักได้ประมาณ 29 ชนิด เช่น แอมโมเนีย เอมีน กรดอะซิติก และ multiple volatile organic compounds (VOCs : ไฮโดรคาร์บอน คีโตน เอสเทอร์ เทอร์พีน (terpenes) และ S-compounds)

Michael Durand และ Bradley J. Scott [125] ศึกษาแก๊สที่เกิดจากความร้อนใต้ดินที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศของเมือง Rotoura ประเทศนิวซีแลนด์ด้วยหลอดตรวจวัด และ infrared active gas analyzers ซึ่งแก๊สพิษที่เกิดขึ้นนี้ได้แก่ ไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยนำหลอดตรวจวัดไปวางไว้ยังบริเวณที่ต้องการตรวจวัดเป็นเวลา 10 – 48 ชั่วโมง และทำการวัดทุกๆ 3 เดือน ได้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 200 ppm และ 15% ตามลำดับ

C. W. Emerson [126] ศึกษาสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ (volatile organic compounds) ที่เกิดจากกองขยะด้วยหลอดตรวจวัดเพื่อหาปริมาณของเบนซีน (Benzene) และไวนิลคลอไรด์ (Vinyl chloride) ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 74 % และ 52 % ตามลำดับ และพบว่าหลอดตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัดสามารถหาปริมาณของเบนซีนกับไวนิลคลอไรด์ได้ง่าย เร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการตรวจวัดด้วยวิธีอื่นอย่างมาก

J. G. March, M. Gual และ B. M. Simonet [127] ตรวจวัดปริมาณของคลอรีนตกค้างในน้ำคล้ำด้วยอโรโทลิดีน โดยวิธี batch method และ sequential injection method พบว่าการเกิดปฏิกิริยาของอโรโทลิดีนกับคลอรีนคงเหลือในน้ำคล้ำจะเกิดซ้ำเนื่องจากผลของ matrix จากการศึกษพบว่าวิธี batch method และ sequential injection method สามารถหาช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธี (linear range of the methods) ได้เท่ากับ 0–3.0 และ 0–5.0 mgCl<sub>2</sub>/L และสามารถตรวจวัดสารได้ความเข้มข้นน้อยที่สุด (limit of quantification) เท่ากับ 0.2 และ 0.5 mgCl<sub>2</sub>/L ตามลำดับ

Aki Sakai และคณะ [128] วิเคราะห์หาปริมาณของคลอรีนตกค้างในน้ำประปาด้วยวิธี FIA (flow injection analysis) โดยใช้ Pb(II) ion-selective electrode (ISE) ซึ่งภายในระบบประกอบด้วย millivolt meter, peristaltic pump, Pb(II)-ISE detector และ recorder ได้ค่าความเป็นเส้นตรง (linearity) เท่ากับ 0.1 - 1.0 mg/L ค่า relative standard deviation เท่ากับ 0.2 mg/L และความเข้มข้นของคลอรีนตกค้างเท่ากับ 2 % โดยเมื่อศึกษาค่าทางสถิติได้สมการเส้นตรงกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ  $Y=0.75X+0.17$  และ 0.967 ตามลำดับ

Mathias Belz และคณะ [129] หาปริมาณของคลอรีนตกค้างในน้ำด้วย Smart-sensor ซึ่งภายในระบบประกอบด้วย monolithic diode array spectrometer ของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ตรวจวัดในช่วงความยาวคลื่น 430 nm และใช้คอมพิวเตอรืควบคุมหลอดควิที่เรียม (deuterium lamp) ได้ค่า detection limit เท่ากับ 0.2 mg/L

S. G. Dmitrienko และคณะ [130] ตรวจวัดปริมาณของคลอรีนอิสระในน้ำโดยนำคลอรีนอิสระไปทำปฏิกิริยากับ polyurethane foams (PUF) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนอิสระกับ polyurethane foams จะเกิดที่ผิวของโทลูอิดีน (toluidine groups) ในสถานะที่เป็นกรด และได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลือง แล้วจึงตรวจวัดด้วยวิธี diffuse reflectance spectroscopy ได้ค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 5–150 µg

Raquel B.R. Mesquita และ António O.S.S. Rangel [131] หาปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำด้วยการนำคลอรีนอิสระมาทำปฏิกิริยากับอโรไดนิสซิดีน (o-dianisidine) ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ

ด้วย Gas diffusion sequential injection system โดยใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานไอโอดเมทริกไทเทรชัน สามารถหาความเข้มข้นของคลอรีนอิสระได้เท่ากับ 0.6 mg ClO<sup>-</sup>/L

F. Javier Del Campo และคณะ [132] ศึกษาการตรวจวัดปริมาณของคลอรีนอิสระในน้ำดื่มด้วยแอมเพอโรเมทริกเซนเซอร์ (amperometric sensor) โดยใช้ขั้วแคโทดทอง (gold cathodes) เปรียบเทียบกับขั้วแคโทดแพลทินัม (platinum cathodes) ใช้ศักย์ไฟฟ้า 0.150 V เทียบกับ Ag/AgCl (3 MKCl) และค่า pH ที่ใช้อยู่ในช่วง 5–8 จากการศึกษาพบว่า pH ของการตรวจวัดจะมีผลต่อสัญญาณของแอมเพอโรเมทรี

Fumihiko Kodera และคณะ [133] ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระโดยใช้เทคนิคอะโนดิกโวลแทมเมทรี (anodic voltammetry) ด้วยอิเล็กโทรดแพลทินัม อิเล็กโทรดทอง และอิเล็กโทรดแกรสซีคาร์บอน (glassy carbon electrodes) เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานวิธีมาตรฐานไอโอดเมทริกไทเทรชัน สามารถตรวจวัดปริมาณของคลอรีนอิสระได้ความเข้มข้น 4–400 mg Cl /L

Ludvig Moberg และ Bo Karlberg [134] หาปริมาณของคลอรีนอิสระด้วย *N,N'*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD) โดยใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรีวัดที่ความยาวคลื่น 515 nm และ 324 nm พบว่าที่ความยาวคลื่น 515 nm จะหาปริมาณคลอรีนอิสระได้ในช่วง 0.7–56  $\mu$ M/L เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 100  $\mu$ M/L ค่าการดูดกลืนจะลดลง แต่ถ้าลดความยาวคลื่นให้เป็น 324 nm จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้น ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนความยาวคลื่นให้อยู่ในช่วง 200–600 nm จะสามารถวัดปริมาณคลอรีนอิสระได้ความเข้มข้นถึง 200  $\mu$ M/L

Karin Carlsson และคณะ [135] หาปริมาณของคลอรีนอิสระและคลอรีนคงเหลือในน้ำด้วย *N,N'*-diethyl-*p*-phenylenediamine (DPD) พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นมาโดยอาศัยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer) เพื่อควบคุม pH โดย *N,N'*-diethyl-*p*-phenylenediamine จะเป็นรีเอเจนต์ที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระและคลอรีนคงเหลือจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสี และตรวจวัดด้วยระบบ FIA สารตัวอย่าง รีเอเจนต์ และสารละลายบัฟเฟอร์จะถูกนำเข้าสู่ระบบด้วยปั๊ม 25  $\mu$ L ต่อ 1 ครั้ง ด้วยอัตราการไหล 90  $\mu$ L/นาทีก และใช้เวลาในการวัดเพียง 2 นาที และพบว่าคลอรีน คลอรามีนมีค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดที่น้อยที่สุด (limit of detection) เท่ากับ 3.2  $\mu$ M และ 1.9  $\mu$ M ตามลำดับ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 สารเคมี

- 3.3.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) A.R. grade บริษัท LAB SCAN
- 3.3.1.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) A.R. grade บริษัท LAB SCAN
- 3.3.1.3 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide) A.R. grade บริษัท LAB SCAN
- 3.3.1.4 เอทานอล (Ethanol) A.R. grade บริษัท LAB SCAN
- 3.3.1.5 ออโธโทลิดีน (Orthotolidine) A.R. grade บริษัท Aldrich
- 3.3.1.6 แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ (Calcium hypochlorite) A.R. grade บริษัท LAB SCAN
- 3.3.1.7 น้ำกลั่น (Distillation water) และน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionization water : DI)
- 3.3.1.8 ซิลิกาเจล (Silica gel) เตรียมจากแคลบข้าว
- 3.3.1.9 แกลบข้าว

##### 3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.2.1 เตาเผาความร้อนสูง (High temperature furnace) : CSF 1200, Carbolite Furnaces
- 3.1.2.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) : 1455VP/EDAX® , LEO
- 3.1.2.3 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกชอานาไลซ์เซอร์ (Thermogravimetric Analyzer; TGA) :Pyris 1 TGA, Perkin Elmer
- 3.1.2.4 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Surface area Analyzer) : Autosorb-1, Quana Chrome
- 3.1.2.5 เครื่องวัดการกระจายตัวของอนุภาค (Particle size Analyzer) : Mastersizer X, MaLYERN
- 3.1.2.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier transforms infrared spectrometer;FT-IR) : FTIR spectrum GX, Perkin Element
- 3.1.2.7 เครื่องอินดักทีฟคัปเปิลพลาสมาแมสสเปกโทรมิเตอร์ (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer ; ICP-MS) : ELAN 6000 ICP-MS

- 3.1.2.8 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) : Model type 6400 Spectrophotometer, TECHNE
- 3.1.2.9 เครื่องพ่นแห้ง (Spray dryer) : Model type L-8 , Ohkawara
- 3.1.2.10 แท่นให้ความร้อนและปั่นกวน (Hot plate and Magnetic stirrer) : Model type M21/1m
- 3.1.2.11 เครื่องเขย่า (Shaker) : GALLENKAMP
- 3.1.2.12 ปั๊มดูดอากาศ (Vacuum pump) : ASPIRATOR A-35
- 3.1.2.13 ตู้อบ (Oven) : Isotemp Oven, Fisher Scientific
- 3.1.2.14 เครื่องระเหยแบบสุญญากาศ (Rotary Vacuum Evaporator) : N – N Series
- 3.1.2.15 เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) : Model type 215, Denver Instrument
- 3.1.2.16 เครื่องร่อนคัดขนาดอนุภาค (Sieve shaker) : Refsch type vibro
- 3.1.2.17 ตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 35 เมช (500  $\mu\text{m}$ ), 70 เมช (210  $\mu\text{m}$ ), 100 เมช (149  $\mu\text{m}$ ) และ 200 เมช (75  $\mu\text{m}$ ): ASTM E11, Endecotts Ltd.
- 3.1.2.18 เตาเผาความร้อนสูง (High temperature furnace) : CSF 1200, Carbolite Furnaces
- 3.1.2.19 มอเตอร์ปั่นกวนและใบพัด (Motor stirrer and propeller) : SL2400, StedFast™ Stirre

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมอนุภาคซิลิกาจากแกลบข้าว

- ศึกษาวิธีการเตรียมสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกตจากแกลบข้าว
- ศึกษาวิธีการเตรียมอนุภาคซิลิกาจากสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกต
- วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว
  - วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลิกา
  - วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา
  - วิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของอนุภาคซิลิกา
  - วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ของอนุภาคซิลิกา
  - วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของอนุภาคซิลิกา
  - วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซิลิกา
  - วิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนของอนุภาคซิลิกา

#### ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาการเตรียมซิลิกา – ออโรโทลิดีน (Silica – o – tolidine )

- การเตรียมซิลิกา – ออโรโทลิดีนด้วยร้อยละการเคลือบต่างๆ
- วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน
  - วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน
  - วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน
  - วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน
  - วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน

#### ขั้นตอนที่ 3 การเตรียมหลอดตรวจวัด

- การบรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีนที่ร้อยละของการเคลือบต่างๆ ลงในหลอดแก้วปลายปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm
  - ศึกษาร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีนที่เหมาะสม
  - ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัด
  - ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัด
  - ศึกษาการระบุนุสเกลข้างหลอดตรวจวัดเพื่อระบุนุสเกลตามความเข้มข้น

#### ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบความถูกต้องของวิธี (validation method)

- การเตรียมกราฟมาตรฐานคลอโรนอิสระ
- การศึกษาความเที่ยงของหลอดตรวจวัด

- การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample
- การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่าง

ขั้นตอนที่ 6 สรุปผลการวิจัยและรายงานผล

### 3.3 วิธีวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมสาร

##### 3.3.1.1 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M

นำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นมา 83.6 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.2 การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 15 % (v/v)

นำกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นมา 150 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 % (w/v)

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่น เทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.4 การเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 15 % (v/v)

นำแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นมา 150 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.5 การเตรียมสารละลายออโรโทลิติน 1.00 % (w/v)

ชั่งออโรโทลิติน 1.0000 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายด้วยเอทานอล เทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.6 การเตรียมสารละลายออโรโทลิติน 0.10 % (w/v)

ปิเปตสารละลายออโรโทลิติน 1.00 % (w/v) 10.00 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.7 การเตรียมสารละลายออโรโทลิติน 0.01 % (w/v)

ปิเปตสารละลายออโรโทลิติน 1.00 % (w/v) 1.00 mL ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล เขย่าให้เข้ากัน

##### 3.3.1.8 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ 500 ppm

ชั่งแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ 0.2521 g ใส่ในบีกเกอร์ ละลายน้ำกลั่น เทใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเขย่าให้เข้ากัน และทำมาตรฐานสารละลาย (re – standardize) ด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต [35]

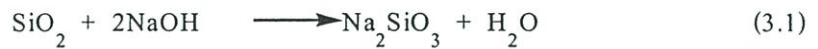
### 3.3.1.9 การเตรียมคลอรีนอิสระความเข้มข้น 3 – 100 ppm

เตรียมคลอรีนอิสระความเข้มข้น 3, 5, 7, 10, 13, 15, 17, 20, 23, 25, 27, 30, 33, 35, 37, 40, 43, 45, 47, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ppm โดยปีเปตสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้น 500 ppm ปริมาตร 0.6, 1, 1.4, 2, 2.6, 3, 3.4, 4, 4.6, 5, 5.4, 6, 6.6, 7, 7.4, 8, 8.6, 9, 9.4, 10, 12, 14, 16, 18 และ 20 mL ตามลำดับลงในขวดวัดปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

### 3.3.1.10 การเตรียมอนุภาคซิลิกาจากแคลบข้าว

#### 1. ศึกษาวิธีการเตรียมสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกตจากแคลบข้าว

การเตรียมสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกตโดยอาศัยปฏิกิริยาต่อไปนี้



เผาถ่านแคลบที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง บดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 35 เมช ถังแคลบที่ร่อนได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.1 M โดยการแช่ คนด้วยแท่งแม่เหล็กและเครื่องช่วยกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปกรองด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ ถังด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง นำถ่านแคลบไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ชั่งถ่านแคลบ จดบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน นำไปต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (w/v) ที่อุณหภูมิ 80-85 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้คำนวณจากความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (w/v) จากสมการที่ 3.2 [119]

$$\text{NaOH}_{\text{required}} = \left[ \frac{X \cdot \left( \frac{Y\%}{100} \right)}{\text{MW} \cdot \text{SiO}_2} \right] \times 2(\text{MW} \cdot \text{NaOH}) \quad (3.2)$$

กำหนดให้

X	คือ น้ำหนักของถ่านแคลบ (g)
Y	คือ เปอร์เซ็นต์ของซิลิกาที่มีอยู่ในถ่านแคลบ (%)
$\text{MW} \cdot \text{SiO}_2$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของซิลิกา
$\text{M.W.}_{\text{NaOH}}$	คือ น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

เมื่อได้สารละลายสีน้ำตาลอ่อน ปล่อยสารละลายที่ได้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง กรองสารละลายด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ จะได้สารละลายใสของโซเดียมเมทาซิลิเกต

## 2. ศึกษาวิธีการเตรียมอนุภาคซิลิกาจากสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกต

ปรับ pH ของสารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 15 %(v/v) ให้เป็น 10.00 จะได้เจลเกิดขึ้น แล้วปรับ pH ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 15 %(v/v) ให้ลดลงเป็น 1.00 เพื่อให้เจลเกิดการกระจายตัว เก็บสารละลายทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปรับ pH ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 15 %(v/v) ให้เป็น 7.00 นำไปผ่านเครื่องพ่นแห้ง เพื่อให้เป็นอนุภาคซิลิกาด้วยสภาวะดังต่อไปนี้

Mechanical Stirrer Speed	2.5-3
Gel Forming Temperature	Room temperature
Atomizer (Spray dryer)	50 Hz
Atomizer Speed set	4
Cyclone P.G.	50 mm H <sub>2</sub> O
Pump Speed	45

นำอนุภาคซิลิกามาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น โดยการแช่ คนด้วยแท่งแม่เหล็กและเครื่องช่วยกวนเป็นเวลา 20 นาที กรองด้วยกรวยกรองบุชเนอร์ ล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วคัดแยกขนาดของอนุภาคด้วยการผ่านตะแกรงร่อนขนาด 35, 70, 100 และ 200 เมช ตามลำดับ

## 3. วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว

- ก. วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลิกาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)
- ข. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค Light Scattering Analysis (Mastersizer X)
- ค. วิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเครื่อง Autosorb
- ง. วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent (XRF)
- จ. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)
- ฉ. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรเมทรี (FT-IR)
- ช. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนในซิลิกาด้วยเทคนิค ICP-MS

### 3.3.2 ศึกษาการเตรียมซิลิกา – ออโรโทลิดีน (Silica – o – tolidine )

3.3.2.1 การเตรียมซิลิกา – ออโรโทลิดีนด้วยร้อยละการเคลือบ (%coat) 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 , 2.00, 3.00, 4.00, และ 5.00 % (w/w)

ซึ่งซิลิกา ปิเปตสารละลายออโรโทลิดีน และปิเปตเอทานอลปริมาตรตามตารางที่ 3.1 ใส่ในขวดรูปชมพู่

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนปริมาณซิลิกา สารละลายออโรโทลิดีน และเอทานอล ด้วยร้อยละการเคลือบ 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 , 2.00, 3.00, 4.00, และ 5.00 % (w/w)

ร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีน (% : w/w)	ปริมาณซิลิกา (g)	ปริมาณออโรโทลิดีน			ปริมาณเอทานอล (mL)
		ความเข้มข้นของสารละลายออโรโทลิดีน (% : w/v)	ปริมาตรสารละลายออโรโทลิดีนที่ใช้ (mL)	คำนวณเป็นน้ำหนักของออโรโทลิดีน (g)	
0.01	0.9999	0.01	1.00	0.0001	19.00
0.05	0.9995	0.01	5.00	0.0005	15.00
0.10	0.9990	0.10	1.00	0.0010	19.00
0.50	0.9950	1.00	0.50	0.0050	19.50
1.00	0.9900	1.00	1.00	0.0100	19.00
2.00	0.9980	1.00	2.00	0.0200	18.00
3.00	0.9970	1.00	3.00	0.0300	17.00
4.00	0.9960	1.00	4.00	0.0400	16.00
5.00	0.9950	1.00	5.00	0.0500	15.00

นำสารผสมที่ได้จากตารางที่ 3.1 ไปเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าอัตราเร็ว 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไประเหยเอทานอลออกด้วยเครื่องระเหยแบบสูญญากาศ นำซิลิกา - ออโรโทลิดีนมาอบที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

#### 3.3.2.2 วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน

1. วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลิกาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope
2. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค Light Scattering Analysis
3. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis
4. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรเมทรี

### 3.3.3 การเตรียมหลอดตรวจวัด

#### 3.3.3.1 การบรรจุซีลีกา – ออโรโทลิดีนลงในหลอดแก้วปลายปิดแบบต่างๆ

1. การบรรจุซีลีกา – ออโรโทลิดีนในหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม

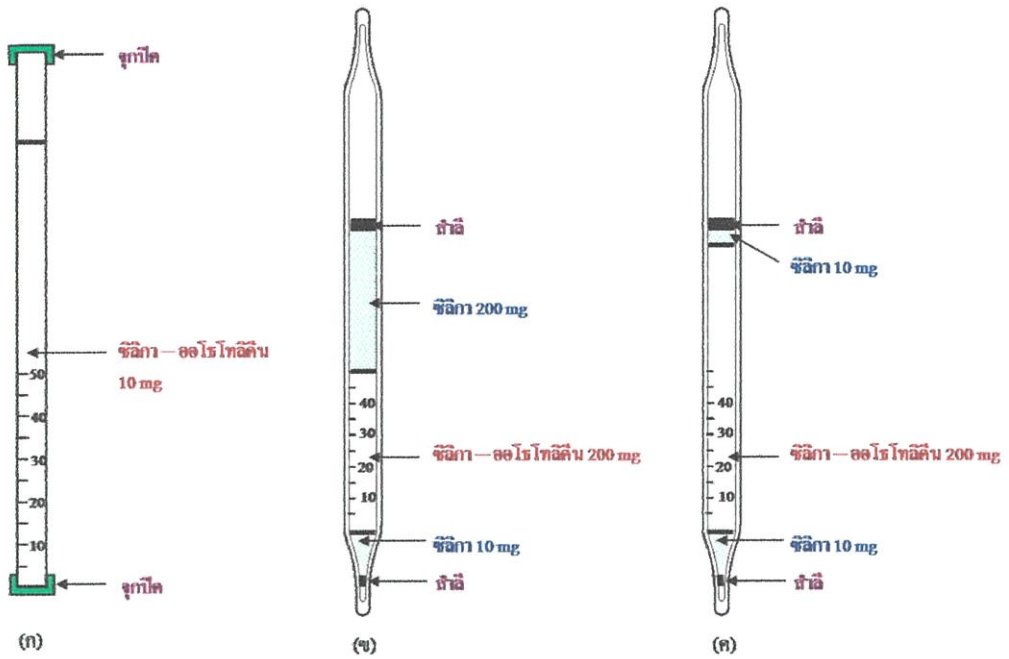
ปิดปลายหลอดแก้วด้วยจุกปิดดังแสดงในรูปที่ 3.1ก ซังซีลีกา – ออโรโทลิดีน 10 mg ใส่ในหลอดแก้ว เขย่าด้วยเครื่องเขย่าอัตราเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้ซีลีกา – ออโรโทลิดีนภายในหลอดแก้วถูกอัดแน่นและสม่ำเสมอ ปิดจุกที่ปลายหลอดแก้วอีกด้าน จะได้หลอดตรวจวัดซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1ก

2. การบรรจุซีลีกา – ออโรโทลิดีนในหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม

ใส่สำลีที่ปลายหลอดแก้วดังแสดงในรูปที่ 3.1ข ซังซีลีกา 10 mg ใส่ในหลอดแก้วแล้วผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในหลอดแก้วเพื่อทำให้ซีลีกาที่อยู่ในหลอดแก้วถูกอัดแน่นและสม่ำเสมอ ซังซีลีกา – ออโรโทลิดีน 200 mg ใส่ในหลอดแก้วแล้วผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในหลอดแก้ว ซังซีลีกา 200 mg ใส่ในหลอดแก้วแล้วผ่านแก๊สไนโตรเจน ใส่สำลี นำหลอดแก้วที่ได้ไปปิดปลายทั้ง 2 ข้างจะได้หลอดตรวจวัดซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1ข

3. การบรรจุซีลีกา – ออโรโทลิดีนในหลอดแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด

ใส่สำลีที่ปลายหลอดแก้วดังแสดงในรูปที่ 3.1ค ซังซีลีกา 10 mg ใส่ในหลอดแก้วแล้วผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในหลอดแก้วเพื่อทำให้ซีลีกาที่อยู่ในหลอดแก้วถูกอัดแน่นและสม่ำเสมอ ซังซีลีกา – ออโรโทลิดีน 200 mg ใส่ในหลอดแก้วแล้วผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในหลอดแก้ว ซังซีลีกา 10 mg ใส่ในหลอดแก้วแล้วผ่านแก๊สไนโตรเจน ใส่สำลี นำหลอดแก้วที่ได้ไปปิดปลายทั้ง 2 ข้างจะได้หลอดตรวจวัดซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1ค



**รูปที่ 3.1** วิธีการบรรจุซีลีกา - ออโรโทลิดีนลงในหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีฉีด (ค)

### 3.3.3.2 ศึกษาอัตราการเคลือบออโรโทลิดีนที่เหมาะสม

นำหลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นได้ทั้ง 3 แบบ ด้วยอัตราการเคลือบ 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 % (w/w) มาทดสอบกับคลอโรฟิลาอิมิตเรสความเข้มข้น 50 ppm ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

#### 1. หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม

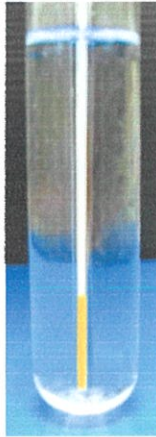
จุ่มหลอดตรวจวัดลงในคลอโรฟิลาอิมิตเรสความเข้มข้น 50 ppm ดังแสดงในรูปที่ 3.2ก เป็นเวลา 10 นาที วัฏระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซีลีกา - ออโรโทลิดีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง โดยแต่ละอัตราการเคลือบทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง และในการทดสอบกับคลอโรฟิลาอิมิตเรสของแต่ละอัตราการเคลือบทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

#### 2. หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม

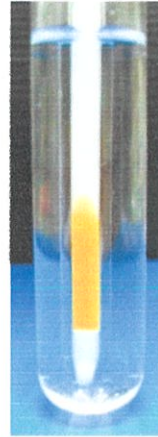
จุ่มหลอดตรวจวัดลงในคลอโรฟิลาอิมิตเรสความเข้มข้น 50 ppm ดังแสดงในรูปที่ 3.2ข เป็นเวลา 10 นาที วัฏระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซีลีกา - ออโรโทลิดีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง โดยแต่ละอัตราการเคลือบทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง และในการทดสอบกับคลอโรฟิลาอิมิตเรสของแต่ละอัตราการเคลือบทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

### 3. หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด

ฉีดคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 0.5 mL เข้าไปในหลอดตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 3.2c วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซิติกา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง โดยแต่ละร้อยผลการเคลื่อนทำซ้ำทั้งหมด 2 ครั้ง และในการทดสอบกับคลอรีนอิสระ ของแต่ละร้อยผลการเคลื่อนทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด (ค)

#### 3.3.3.3 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัด

##### 1. หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม

จากการทดลองในข้อ 3.3.3.2 พบว่าที่ร้อยละการเคลื่อน 0.10 % (w/w) ให้ผลการทดลองดีที่สุด จึงนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิติกา – ออโซโทลิคีน 0.10 % (w/w) มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยจุ่มหลอดตรวจวัดลงในคลอรีนอิสระเป็นเวลา 5 นาที วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซิติกา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง และทดสอบเพิ่มโดยเปลี่ยนเวลาในการทดสอบจาก 5 นาที เป็น 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ การทดสอบกับคลอรีนอิสระของแต่ละช่วงเวลาการตรวจวัดทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

จากนั้นทำการเตรียมหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.10 % (w/w) ใหม่ซ้ำอีกครั้ง และทำการทดลองเหมือนข้างต้น

## 2. หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม

จากการทดลองในข้อ 3.3.3.2 พบว่าที่ร้อยละการเคลือบ 0.10 % (w/w) ให้ผลการทดลองดีที่สุด จึงนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.10 % (w/w) มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยจุ่มหลอดตรวจวัดลงในคลอรีนอิสระเป็นเวลา 5 นาที วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซัลฟิคา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง และทดสอบเพิ่มโดยเปลี่ยนเวลาในการทดสอบจาก 5 นาที เป็น 10, 15 และ 20 นาที ตามลำดับ การทดสอบกับคลอรีนอิสระของแต่ละช่วงเวลากการตรวจวัดทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

จากนั้นทำการเตรียมหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.10 % (w/w) ใหม่ซ้ำอีกครั้ง และทำการทดลองเหมือนข้างต้น

## 3. หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด

จากการทดลองในข้อ 3.3.3.2 พบว่าที่ร้อยละการเคลือบ 0.05 % (w/w) ให้ผลการทดลองดีที่สุด จึงนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยฉีดคลอรีนอิสระปริมาตร 0.5 mL เข้าไปในหลอดตรวจวัด วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซัลฟิคา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลืองเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาทีตั้งแต่เริ่มฉีด และทดสอบเพิ่มโดยเปลี่ยนเวลาในการทดสอบจาก 1 นาที เป็น 2, 3, 4 และ 5 นาที ตามลำดับ การทดสอบกับคลอรีนอิสระของแต่ละช่วงเวลากการตรวจวัดทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

จากนั้นทำการเตรียมหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ใหม่ซ้ำอีกครั้ง และทำการทดลองเหมือนข้างต้น

### 3.3.3.4 ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัด

จากการทดลองในข้อ 3.3.3.3 พบว่าหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ให้ผลการทดลองดีที่สุด จึงนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยฉีดคลอรีนอิสระที่ปรับ pH (ประมาณ 1 – 2) และ ไม่ปรับ pH (10.05) ปริมาตร 0.5 mL เข้าไปในหลอดตรวจวัด วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซัลฟิคา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง การทดสอบกับคลอรีนอิสระของแต่ละ pH ทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

จากนั้นนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิคา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาทำการทดลองเหมือนข้างต้นใหม่ซ้ำอีกครั้ง

### 3.3.3.5 ศึกษาการระบุสเกลข้างหลอดตรวจวัดเพื่อระบุสเกลตามความเข้มข้น

จากการทดลองในข้อ 3.3.3.3 พบว่าหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด จึงนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 17, 20, 23, 25, 27, 30, 33, 35, 37, 40, 43, 45, 47, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ppm ตามลำดับ โดยฉีดคลอรีนอิสระแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 0.5 mL เข้าไปในหลอดตรวจวัดแต่ละอัน วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซิลิกา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง ทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

จากนั้นนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาทำการทดลองเหมือนข้างต้นใหม่ซ้ำอีกครั้ง

### 3.3.3.6 การเตรียมหลอดตรวจวัดคลอรีนอิสระเพื่อใช้งานจริง

นำหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาระบุสเกลความเข้มข้น ตามการทดลองที่ได้จากข้อ 3.3.3.5

## 3.3.4 การทดสอบความถูกต้องของวิธี (validation method) ของหลอดตรวจวัด

### 3.3.4.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานคลอรีนอิสระ

นำหลอดตรวจวัดหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นจากสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้น 0, 3, 5, 7, 10, 15, 20 และ 25 ppm ตามลำดับ โดยฉีดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นเข้าไปในหลอดตรวจวัดปริมาตร 0.5 mL วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซิลิกา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง และเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี – วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี แต่ละความเข้มข้นทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

### 3.3.4.2 การศึกษาความเที่ยงของหลอดตรวจวัด

นำผลการทดลองจากข้อ 3.3.4.1 มาคำนวณทางสถิติเพื่อทดสอบความเที่ยงของหลอดตรวจวัด

### 3.3.4.3 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample

นำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งปริมาณการเติมเท่ากับ 0, 3, 5, 7, 10, 15 และ 20 ppm ตามลำดับ โดยฉีดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างจริงเข้าไปในหลอดตรวจวัด 0.5 mL วัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของซิลิกา – ออโซโทลิคีนจากสีขาวเป็นสีเหลือง และเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี – วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี แต่ละความเข้มข้นที่เติมทำซ้ำทั้งหมด 10 ครั้ง

#### 3.3.4.4 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่าง

นำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิคีน 0.05 % (w/w) มาตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สระว่ายน้ำสวนพระนคร และสระว่ายน้ำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคลองหก เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี – วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี วิธีเก็บตัวอย่างน้ำจะเก็บแหล่งละ 5 จุดคือบริเวณกลางสระ คั่นทิศเหนือ คั่นทิศใต้ คั่นทิศตะวันออก และคั่นทิศตะวันตกของสระ และตรวจวัดคลอรีนอิสระซ้ำในแต่ละจุดที่เก็บตัวอย่างทั้งหมด 5 ครั้ง

### 3.4 สถานที่ทำการวิจัย

3.4.1 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.4.2 ศูนย์บริการและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

# บทที่ 4

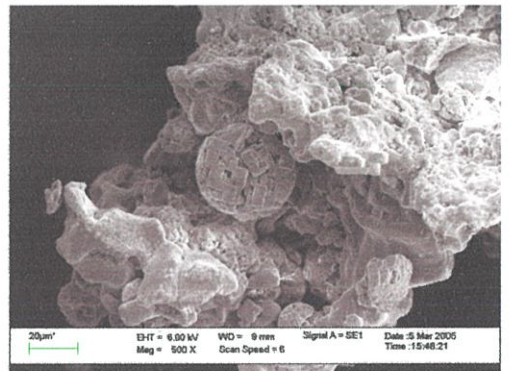
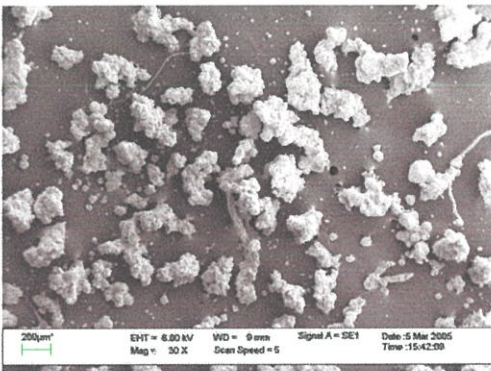
## ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการวิจัย

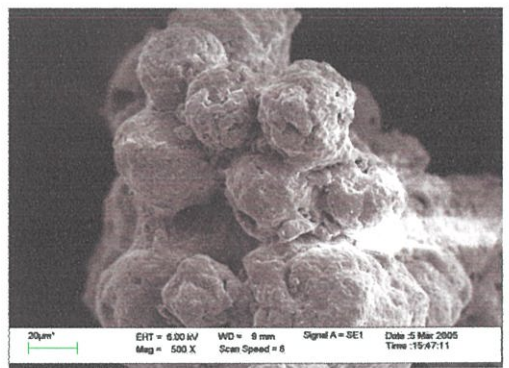
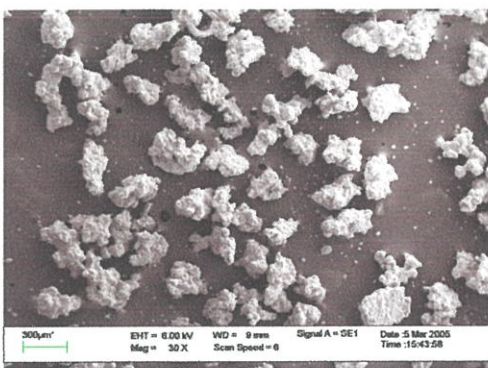
#### 4.1.1 ศึกษาการเตรียมอนุภาคซิลิกา

##### 4.1.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมได้จากแคลบข้าว

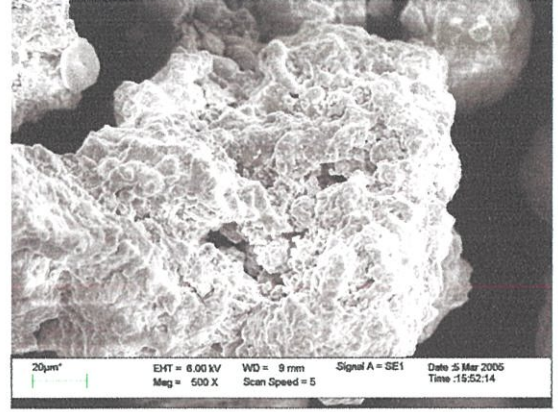
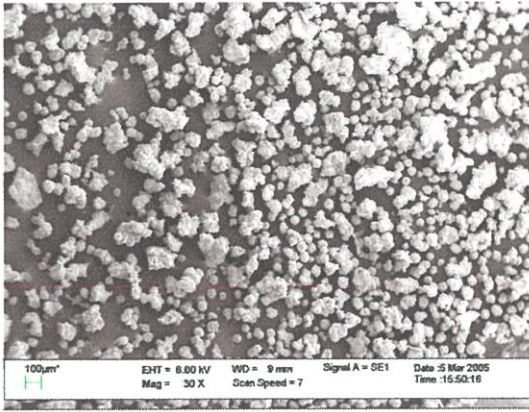
##### 1. วิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลิกาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope



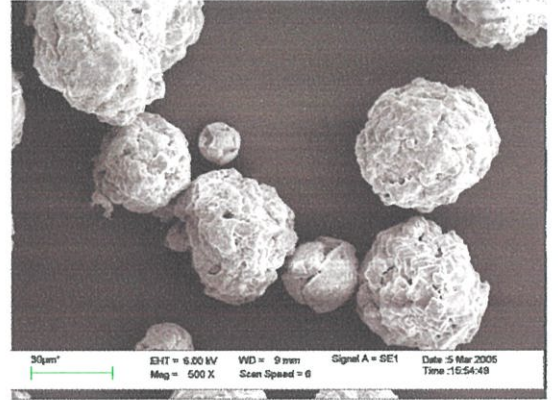
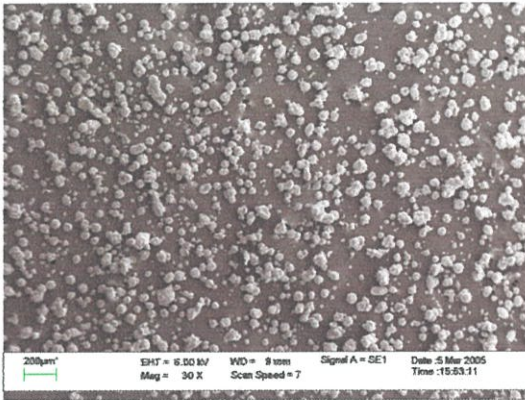
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว โดยผ่าน ตะแกรง ร่อนขนาด 35 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า



รูปที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว โดยผ่านตะแกรง ร่อนขนาด 70 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว โดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว โดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ด้วยกำลังขยาย 30 และ 500 เท่า

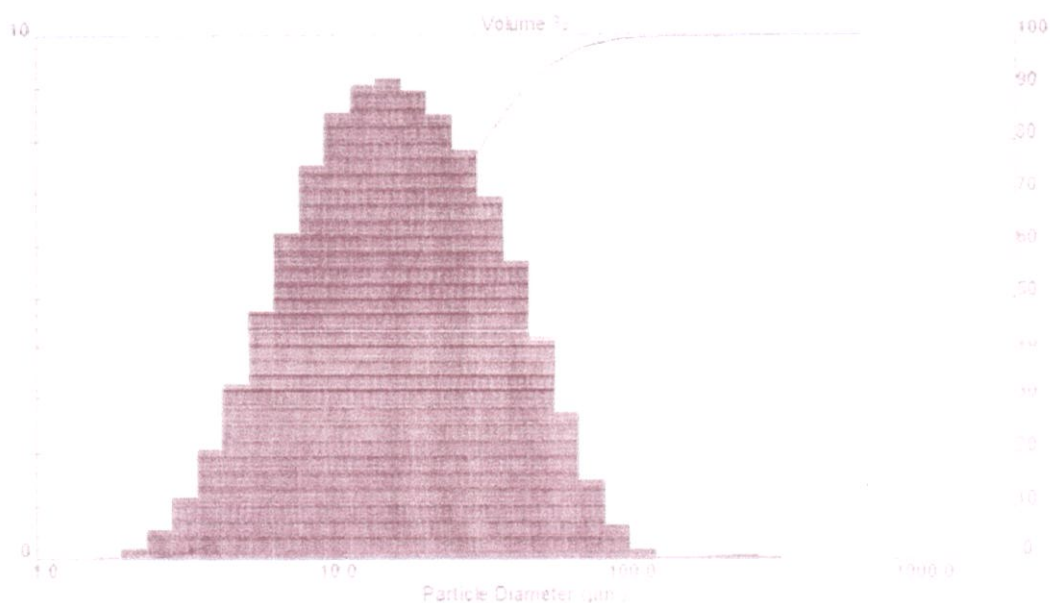
เมื่อนำซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าวที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 35, 70, 100 และ 200 เมช มาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope พบว่าอนุภาคซิลิกาที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 35, 70 และ 100 เมช มีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีความเป็นรูพรุนขนาดไม่สม่ำเสมอ รูปร่างของอนุภาคไม่เป็นทรงกลม และเมื่อเพิ่มกำลังขยายให้มากขึ้นเป็น 500 เท่า พบว่าอนุภาคของซิลิกาติดกันเป็นก้อน ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วงสูงกว่า 500, 210 – 500, 149 – 210  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 แต่อนุภาคซิลิกาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีความเป็นรูพรุน ขนาดสม่ำเสมอ รูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลมและไม่

ติดกันเป็นก้อน ขนาดของอนุภาคต่ำกว่า  $149\ \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ผู้วิจัยจึงเลือกซิลิกาที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มาเตรียมหลอดตรวจวัดเพราะมีความเป็นรูพรุนสูง ขนาดสม่ำเสมอ และรูปร่างเป็นทรงกลมมากกว่า ทำให้ทำให้การแพร่กระจายของโมเลกุลของสารตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจวัดได้พร้อมกัน และสามารถลดการกระจายของแถบโมเลกุลของสารแบบ Eddy diffusion ได้

## 2. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค light scattering analysis

จากการศึกษาค่าการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวโดยเทคนิค light scattering analysis พบว่า อนุภาคซิลิกาที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง  $15.14\ \mu\text{m}$  และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ในช่วง  $16.24\ \mu\text{m}$  เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ 10 % มีเท่ากับ  $5.91\ \mu\text{m}$  เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ 90 % มีเท่ากับ  $45.43\ \mu\text{m}$  และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 10 % ต่อ 90 % ได้ค่าประมาณ 1.0 : 7.7 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และเมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้าแสดงดังในตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าซิลิกาในทางการค้า ข้อดีของอนุภาคซิลิกาที่มีขนาดเล็ก คือเมื่อนำมาเตรียมหลอดตรวจวัดจะสามารถบรรจุลงในหลอดแก้วได้แน่นและสม่ำเสมอ ทำให้การแพร่กระจายของโมเลกุลของสารตัวอย่างเข้าไปในหลอดตรวจวัดได้พร้อมกัน และสามารถลดการกระจายของแถบโมเลกุลของสารแบบ Eddy diffusion ได้



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้า [150]

ชนิด	ขนาดอนุภาค (Particle Size : $\mu\text{m}$ )
ซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าว	15.14
Silica Gel 40	63-200
Silica Gel 40	200-500
Silica Gel 60	15-40
Silica Gel 60	40-63
Silica Gel 60	< 63
Silica Gel 60	63-100
Silica Gel 60	63-200
Silica Gel 60 extra pure	63-200
Silica Gel 60	200-500
Silica Gel 100	63-200
Silica Gel 100	200-500
Silica Gel 60 F254	63-200

### 3. วิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเครื่อง Autosorb

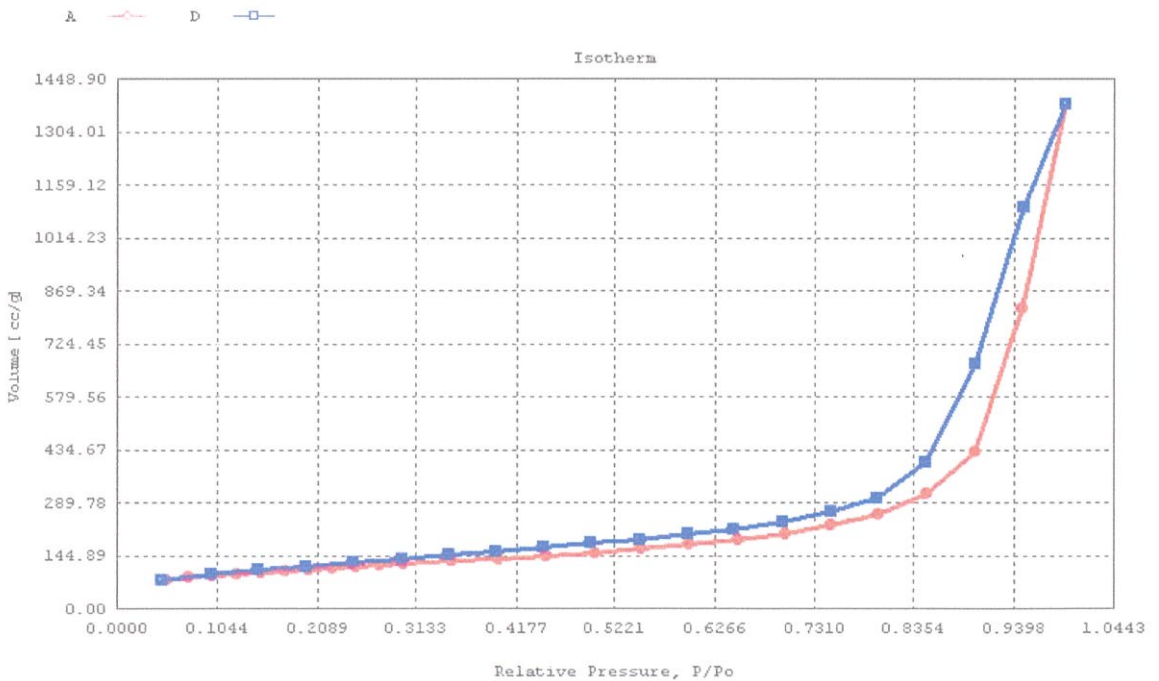
ไอโซเทอมที่ได้จากการแอดซอร์บ (adsorb) และดีซอร์บ (desorb) แก๊สไนโตรเจนของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวซึ่งผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าเส้นกราฟสีแดง คือ ปริมาณการแอดซอร์บแก๊สไนโตรเจนบนผิวของอนุภาคซิลิกา ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวของแก๊สไนโตรเจนบนผิวซิลิกา (ชั้นที่ 1) ตั้งแต่ค่า  $P/P_0$  ประมาณ 0.05 และจะมีการจัดเรียงตัวของแก๊สไนโตรเจนบนผิวของซิลิกาอย่างสมบูรณ์เมื่อค่า  $P/P_0$  ประมาณ 0.8 และค่า  $P/P_0$  มากกว่า 0.8 คือ ปริมาณการดีซอร์บแก๊สไนโตรเจนบนผิวของแก๊สไนโตรเจน (ชั้นที่ 2) ส่วนเส้นสีน้ำเงิน คือ ปริมาณการดีซอร์บแก๊สไนโตรเจน ซึ่งค่า  $P/P_0$  มากกว่า 0.8 คือ ปริมาณการดีซอร์บแก๊สไนโตรเจนบนผิวของแก๊สไนโตรเจน (ชั้นที่ 2) และค่า  $P/P_0$  ประมาณ 0.05-0.8 คือ การดีซอร์บของแก๊สไนโตรเจนบนผิวซิลิกา (ชั้นที่ 1) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.6 มาแทนค่าจากสมการที่ 4.1 จะสามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวสัมผัสของซิลิกาได้

$$S = \frac{X_m}{M} N_0 A_m \times 10^{-20} \quad 4.1$$

เมื่อ

- S คือ พื้นที่ผิวสัมผัสหรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (area หรือ specific surface area)
- $X_m$  คือ ค่าความจุของแก๊สในโตรเจนบนผิวซิลิกาชั้นที่ 1
- M คือ มวลโมเลกุลของซิลิกา (Adsorbate)
- $N_0$  คือ เลขอาโวกาโดร
- $A_m$  คือ พื้นที่ผิวของแก๊สในโตรเจน (Adsorbent) ที่ถูกจับของโดยซิลิกา 1 โมเลกุล หรือ พื้นที่หน้าตัดของขนาดโมเลกุลของซิลิกา

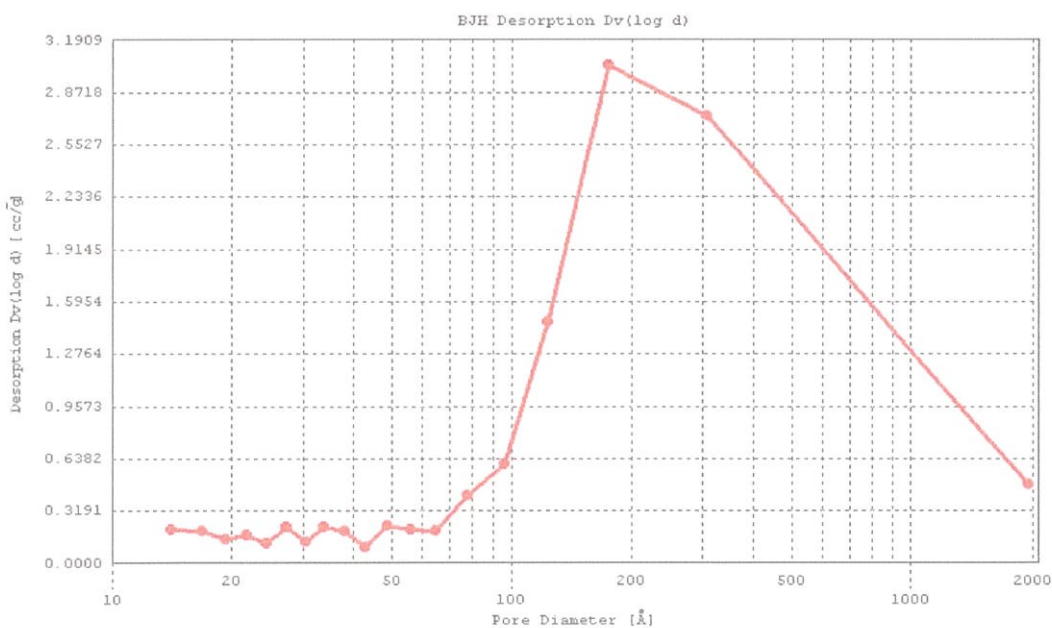
<b>Sample ID :</b>	SiO <sub>2</sub>				
<b>Description</b>	Ad 20, De 20, BET 11				
<b>Comments</b>					
<b>Sample weight</b>	0.0207 g				
<b>Adsorbate</b>	NITROGEN	<b>Outgas temp</b>	350.0 °C	<b>Operator</b>	Offric
<b>Cross-Sec Area</b>	16.2 A <sup>2</sup> /molecule	<b>Outgas temp</b>	8.0 hrs	<b>Analysis Time</b>	838.6 min
<b>NonIdeality</b>	6.580E-05	<b>P/Po Toler</b>	0	<b>End of Run</b>	09/15/2006
05:37					
<b>Molecular Wt</b>	28.0134 g/mol	<b>Equil Time</b>	3	<b>File Name</b>	490914_1



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมที่ได้จากการแอดซอร์บและดีซอร์บแก๊สไนโตรเจนของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมได้จากแคลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb

จากผลการวิเคราะห์อนุภาคซิลิกาที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช ด้วยเครื่อง Autosorp พบว่าซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวมีพื้นที่ผิวสัมผัส (area) เท่ากับ  $386.43 \text{ m}^2/\text{g}$  และขนาดรูพรุน (pore diameter) ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง  $175 \text{ \AA}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งข้อดีของการที่ซิลิกาที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงคือจะทำให้มีตำแหน่งพื้นผิวที่ว่องไว (active surface) มากและเมื่อนำสารมาเคลือบบนอนุภาคซิลิกาจะทำให้โมเลกุล อะตอมหรือ ไอออนของสารที่เคลือบเกิดอันตรกิริยา (interaction) ต่อพื้นที่ผิวที่ว่องไวของอนุภาคซิลิกาได้มาก และเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้าดังแสดงในตารางที่ 4.2

<b>Sample ID :</b>	SiO <sub>2</sub>				
<b>Description</b>	Ad 20, De 20, BET 11				
<b>Comments</b>					
<b>Sample weight</b>	0.0207 g				
<b>Adsorbate</b>	NITROGEN	<b>Outgas temp</b>	350.0 °C	<b>Operator</b>	Offrie
<b>Cross-Sec Area</b>	16.2 Å <sup>2</sup> /molecule	<b>Outgas temp</b>	8.0 hrs	<b>Analysis Time</b>	838.6 min
<b>NonIdeality</b>	6.580E-05	<b>P/Po Toler</b>	0	<b>End of Run</b>	09/15/2006
05:37					
<b>Molecular Wt</b>	28.0134 g/mol	<b>Equil Time</b>	3	<b>File Name</b>	490914_1



รูปที่ 4.7 BJH desorption DV (log d) plot ของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบพื้นที่ผิวสัมผัส ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจาก แกลบข้าวกับซิลิกาในทางการค้า [150]

พารามิเตอร์	ซิลิกาที่เตรียม จากแกลบข้าว	Silica Gel 60 (40-63 $\mu$ m)	Silica Gel 60 (63-200 $\mu$ m)
Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	386.43	~500	~500
Mean Pore Size (Å)	175	60	60

#### 4. วิเคราะห์ความบริสุทธิ์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent

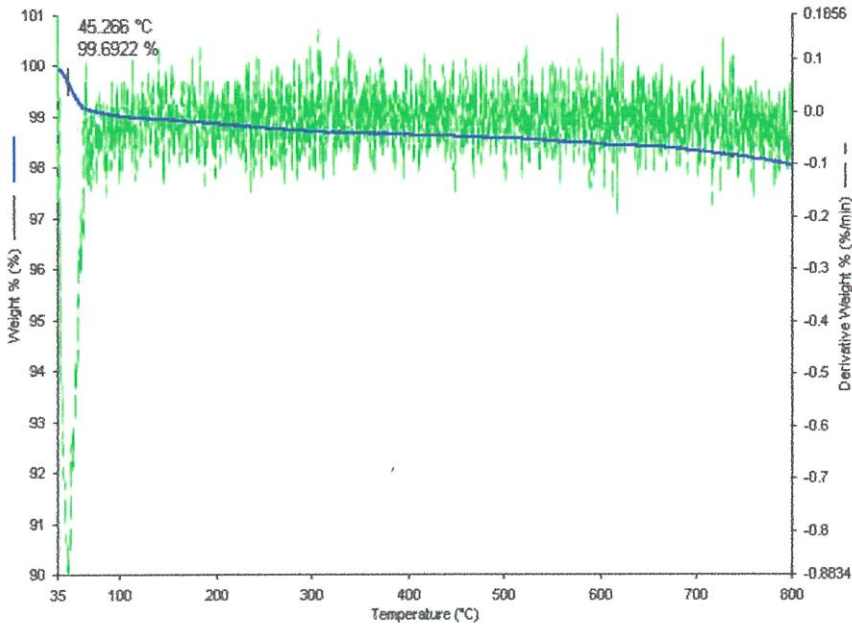
จากการวิเคราะห์หาความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากแกลบข้าวด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent สามารถหาปริมาณความบริสุทธิ์ของซิลิกาได้สูงถึง 99.4 % ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปอร์เซนต์ของซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากแกลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescent

สารที่วิเคราะห์ได้	ความเข้มข้น (% : w/w)
SiO <sub>2</sub>	99.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.327
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.0596

#### 5. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis ของซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าน้ำหนักที่สูญหาย (Weight loss) ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 150 °C เกิดจากการระเหยของน้ำหรือสารอินทรีย์ระเหยได้ (volatile organic compound) ที่ปนเปื้อนจากกระบวนการเตรียม และร้อยละน้ำหนักที่สูญหาย (% Weight loss) จะอยู่ในช่วง 150 – 800 °C



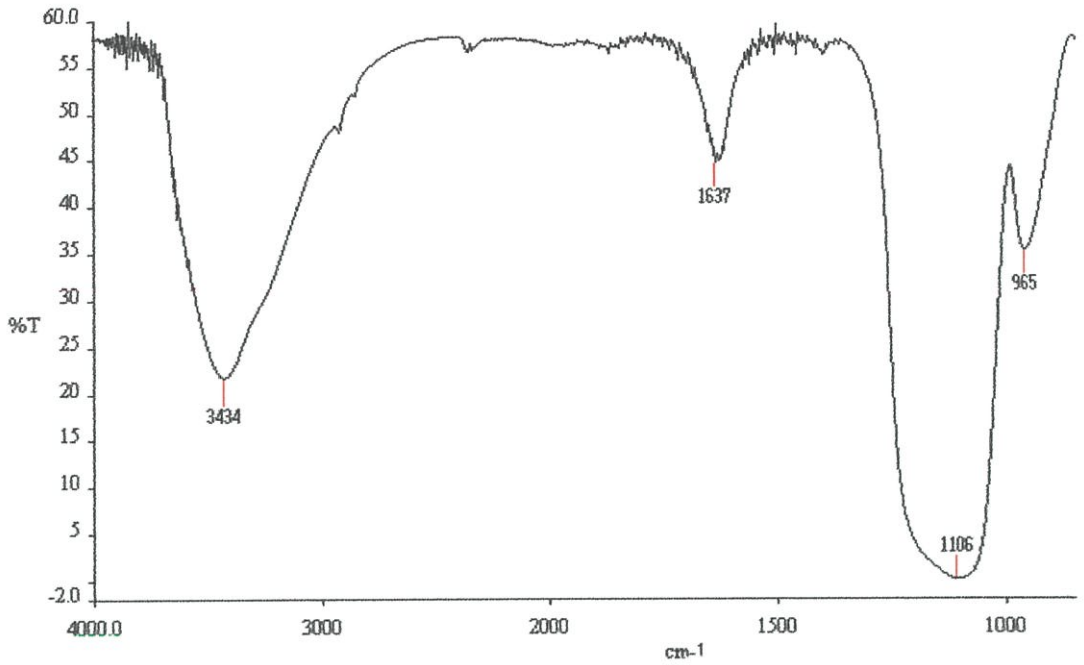
**รูปที่ 4.8** กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากแกลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis

#### 6. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transforms infrared Spectrometry

จากสเปกตรัมของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากแกลบข้าว ด้วยวิธีเตรียมตัวอย่างกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ได้สเปกตรัมที่สำคัญคือ

- ก. หมู่ O–H ยืด ซึ่งเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่ประมาณ  $3500\text{ cm}^{-1}$
- ข. แถบ O–H งอในระนาบประมาณ  $1600\text{ cm}^{-1}$
- ค. แถบการสั่นของ Si–O–Si อยู่ในระนาบประมาณ  $1100\text{ cm}^{-1}$

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าวกับสเปกตรัมของซิลิกา[151] ได้ข้อมูลดังนี้ IR (KBr)  $\nu_{\text{max}}$   $3500$  (–OH stre.),  $1600$  (–OH bend.),  $1100$  (Si–O–Si, stre.) จะเห็นว่าได้ข้อมูลที่ตรงกัน



รูปที่ 4.9 สเปกตรัม FT-IR ของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากเกลบข้าว

#### 7. วิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนในซิลิกาด้วยเทคนิค ICP-MS

เมื่อนำซิลิกาที่เตรียมขึ้นจากเกลบข้าวมาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนด้วยเทคนิค ICP-MS ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ธาตุที่ปนเปื้อนกับซิลิกาในทางการค้า จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของโซเดียม (Na) สูง เนื่องจากในกระบวนการเตรียมซิลิกามีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอีกตัวหนึ่งคือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และสามารถแยกโซเดียมคลอไรด์ออกได้ โดยนำซิลิกาไปล้างด้วยน้ำกลั่นเนื่องจาก โซเดียมคลอไรด์สามารถละลายน้ำได้

ตารางที่ 4.4 ปริมาณธาตุที่ปนเปื้อนในอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-MS เปรียบเทียบกับซิลิกาในทางการค้า [151]

โลหะที่ ปนเปื้อน	ความเข้มข้น					
	ซิลิกาที่เตรียม จากแกลบข้าว	ซิลิกาในทางการค้า				
		Silica Gel Granular		Silica Gel Spherical		Silica Gel Micro Spherical
		Silica Gel, Premium Rf	Silica Gel, Standard Grade	Spherical	Granular	
Na	3916.3 ppm	200 ppm	0.015 %	298 µg/g	530 µg/g	65 ppm
Mg	184.9 ppm	40 ppm	No	No	No	No
Al	1393.1 ppm	No	0.02 %	No	No	No
Ca	720.7 ppm	180 ppm	0.1 %	90 µg/g	1100 µg/g	110 ppm
Cr	<1.4 ppm	No	No	No	No	No
Mn	20.5 ppm	No	No	No	No	No
Fe	<32 ppm	34 ppm	0.005 %	18 µg/g	60 µg/g	4 ppm
Co	324.4 ppm	No	No	No	No	No
Ni	<3.5 ppm	No	No	No	No	No
Cu	<16 ppm	No	No	No	No	No
Zn	277.0 ppm	No	No	No	No	No
Sr	6.6 ppm	No	No	No	No	No
Mo	<0.4 ppm	No	No	No	No	No
Cd	<0.4 ppm	No	No	No	No	No
Sn	169.1 ppm	No	No	No	No	No
Ba	296.1 ppm	No	No	No	No	No
Pb	<6.8 ppm	No	No	No	No	1 ppm

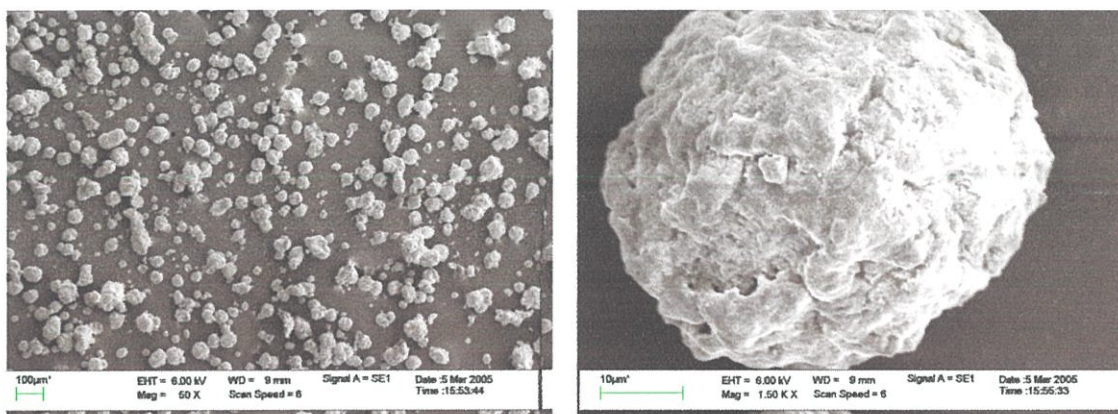
No คือ ไม่รายงาน

#### 4.1.2 ศึกษาการเตรียมซิลิกา – ออโรโทลิดีน (Silica – o – toolidine)

##### 4.1.2.1 วิเคราะห์คุณลักษณะทางกายภาพของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน

###### 1. วิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope

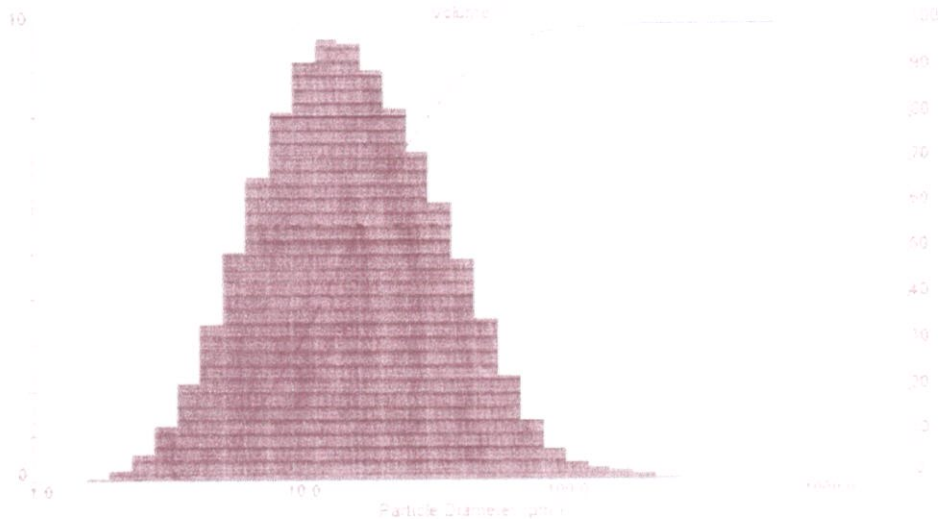
เมื่อนำอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีนมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดของอนุภาคด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope พบว่าอนุภาคซิลิกามีลักษณะพื้นผิวไม่เรียบ มีความเป็นรูพรุนน้อยลง ขนาดสม่ำเสมอ รูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดของอนุภาคต่ำกว่า  $149 \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะพื้นผิว รูปร่างและขนาดของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.01 % (w/w) โดยผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช กำลังขยาย 50 และ 1500 เท่า

###### 2. วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคด้วยเทคนิค light scattering analysis

จากการศึกษาค่าการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีน โดยเทคนิค light scattering analysis พบว่าอนุภาคซิลิกาที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 200 เมช มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วง  $13.93 \mu\text{m}$  และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ  $15.21 \mu\text{m}$  เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ 10 % เท่ากับ  $5.79 \mu\text{m}$  เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ 90 % เท่ากับ  $43.88 \mu\text{m}$  และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 10 % ต่อ 90 % เท่ากับ 1.0 : 7.6 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิดีนกับอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวดังแสดงในตารางที่ 4.5 จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน แสดงว่าหลังจากที่นำซิลิกามาเคลือบด้วยออโรโทลิดีนอนุภาคจะไม่เกาะกันเป็นก้อน



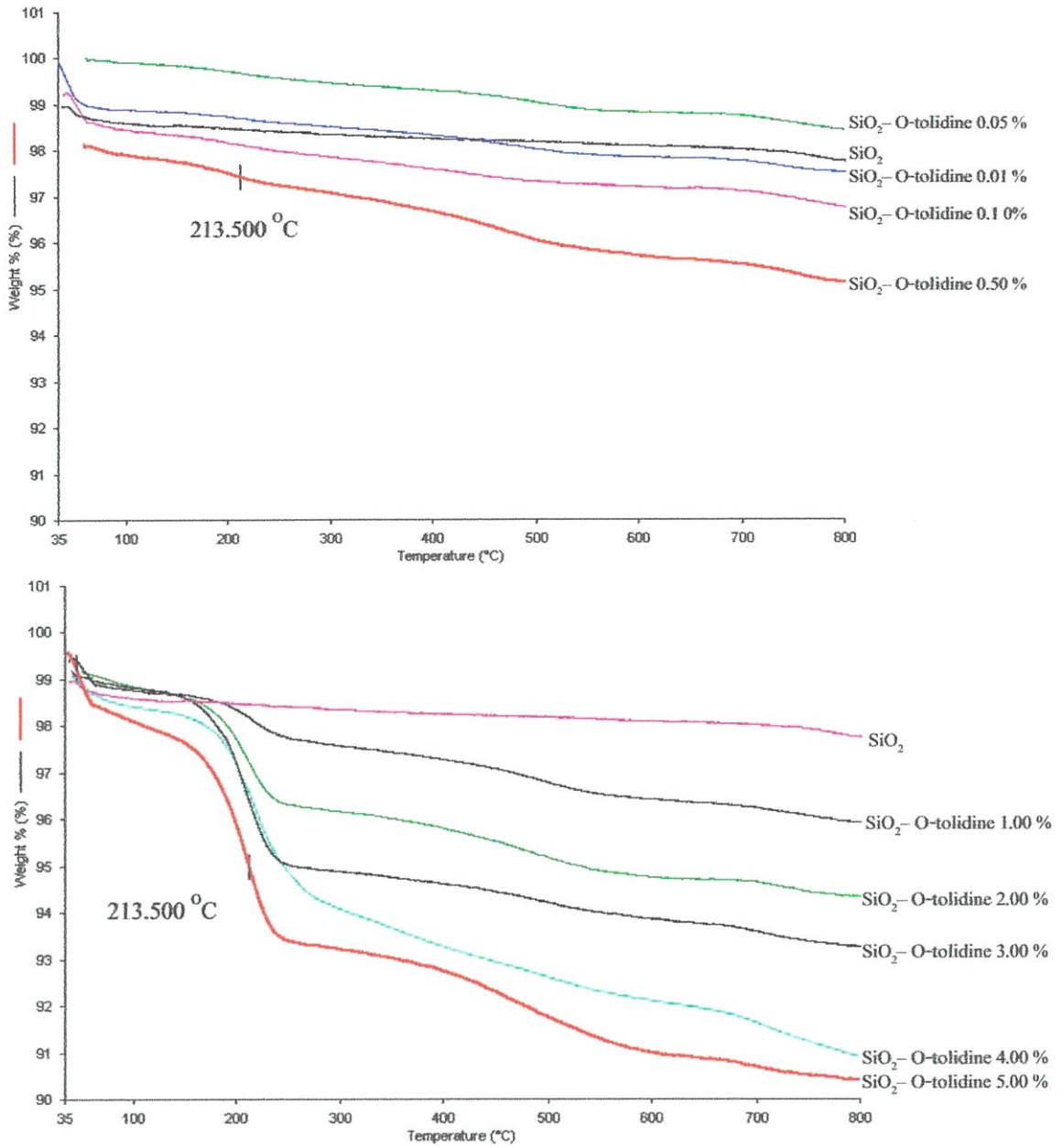
**รูปที่ 4.11** การกระจายตัวของอนุภาคซิติกา – ออโรโทลิคีน 0.01 % (w/w) โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคด้วยเทคนิค light scattering analysis

**ตารางที่ 4.5** เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคซิติกา และซิติกา – ออโรโทลิคีน 0.01 % (w/w) โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิคด้วยเทคนิค light scattering analysis

ชนิด	ขนาดอนุภาค ส่วนใหญ่ (µm)	ขนาดอนุภาค เฉลี่ย (µm)	ขนาดอนุภาคที่ 10 % (µm)	ขนาดอนุภาคที่ 90 % (µm)	ขนาดอนุภาคที่ 10:90 % (µm)
ซิติกาที่เตรียม จากเกลบข้าว	15.14	16.24	5.91	45.43	1.0 :7.7
ซิติกา - ออโร โทลิคีน	13.93	15.21	5.79	43.88	1.0 :7.6

### 3. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis ของซิติกา – ออโรโทลิคีนที่ ร้อยละการเคลือบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าร้อยละ โดยน้ำหนักที่สูญหายอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 150–800.0 °C ได้ร้อยละ โดยน้ำหนักที่สูญหาย และ % carbon loading ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดย จากผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มร้อยละการเคลือบออโรโทลิคีนเพิ่มขึ้น ร้อยละโดยน้ำหนักที่สูญหาย และ % carbon loading จะเพิ่มตามขึ้นด้วย



รูปที่ 4.12 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกาเปรียบเทียบกับซิลิกา-ออโรโทลิดีนที่ร้อยละการเคลือบต่างๆ ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis

ตารางที่ 4.6 ผลร้อยละโดยน้ำหนักที่สูญหายและ % Carbon loading ของซิลิกา-ออโรโทลิคีนในช่วงอุณหภูมิ 150.0 – 800.0 °C โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA

ร้อยละการเคลือบออโรโทลิคีน (%w/w)	ร้อยละโดยน้ำหนักที่สูญหาย (%)	Carbon loading (%)
0.00	0.0000	0.0000
0.01	0.5231	0.4143
0.05	0.6067	0.4805
0.10	0.7744	0.6133
0.50	1.8259	1.4462
1.00	1.9465	1.5417
2.00	3.4688	2.7474
3.00	4.5607	3.6122
4.00	6.4339	5.0958
5.00	6.5105	5.1565

#### 4. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transforms infrared Spectrometry

จากสเปกตรัมของอนุภาคซิลิกา-ออโรโทลิคีน โดยวิธีเตรียมตัวอย่างกับโพแทสเซียมโบรไมด์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ได้สเปกตรัมที่สำคัญคือ

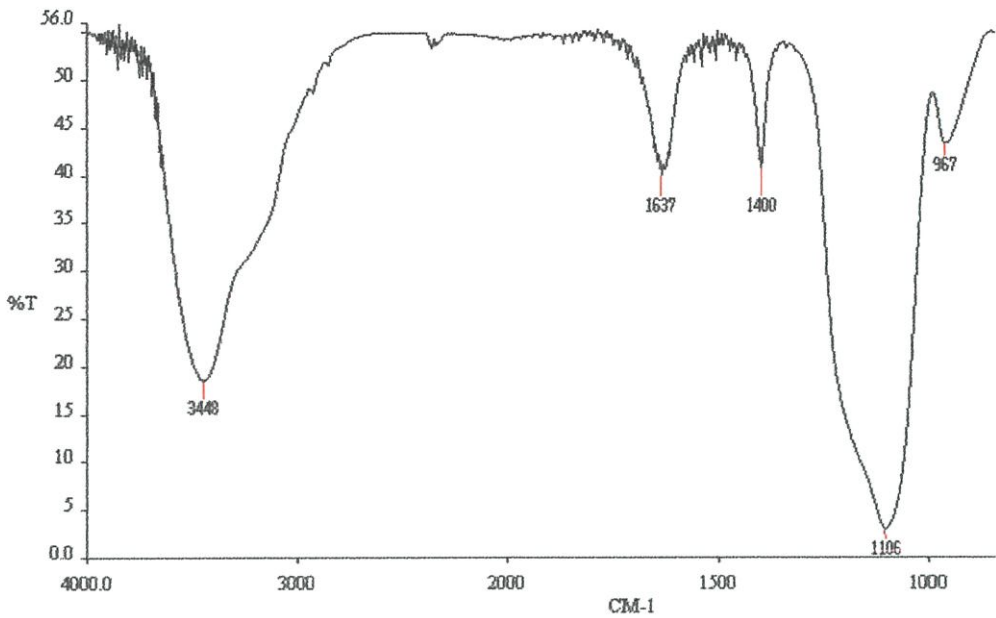
ก. หมู่ O-H ยืด ซึ่งเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่  $3500\text{ cm}^{-1}$

ข. แถบ O-H งอในระนาบประมาณ  $1600\text{ cm}^{-1}$

ค. แถบการสั่นของ Si-O-Si อยู่ในระนาบประมาณ  $1100\text{ cm}^{-1}$

ง. แถบการสั่นของ C=C ในสารประกอบอะโรมาติกอยู่ในระนาบประมาณ  $1600$  และ  $1400\text{ cm}^{-1}$

จากสเปกตรัมของซิลิกา-ออโรโทลิคีน ได้สเปกตรัมเพิ่มเติมจากสเปกตรัมของซิลิกาที่เตรียมจากแคลซิว คือ แถบการสั่นของ C=C อยู่ในระนาบประมาณ  $1600$  และ  $1400\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งมาจาก C=C ในโครงสร้างอะโรมาติกของออโรโทลิคีนดังแสดงในรูปที่ 4.13 ดังนั้นจึงสรุปว่าสามารถเคลือบออโรโทลิคีน บนอนุภาคของซิลิกาได้



รูปที่ 4.13 สเปกตรัม FT-IR ของซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.10 % (w/w)

#### 4.1.3 ศึกษาการเตรียมหลอดวัด

##### 4.1.3.1 ศึกษาอัตราการเคลือบออโซโทลิคีนที่เหมาะสม

เมื่อนำออโซโทลิคีนมาเคลือบบนอนุภาคซิลิกาที่ร้อยละการเคลือบ 0.01, 0.05, 0.10, 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 5.00 % (w/w) จะได้ซิลิกา – ออโซโทลิคีนดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นอนุภาคสีขาว หลังจากก็นำซิลิกา – ออโซโทลิคีนที่ร้อยละการเคลือบ ต่างๆ มาบรรจุใส่ในหลอดตรวจวัดทั้ง 3 แบบ แล้วทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ซิลิกา – ออโซโทลิคีนที่อยู่ภายในหลอดตรวจวัดจะทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระได้สารผลิตภัณฑ์คือฮาโลควิโนน ที่มีสีเหลืองดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.25 โดยหลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นมี 2 ขนาด คือ หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm ใช้วิธีการตรวจวัดแบบจุ่ม ส่วนหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ใช้วิธีการตรวจวัดแบบจุ่มและฉีด



ซิติกา



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 0.01 % (w/w)



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 0.05 % (w/w)



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 0.10 % (w/w)



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 0.50 % (w/w)



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 1.00 % (w/w)



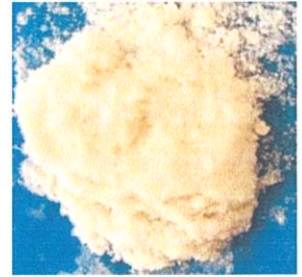
ซิติกา - ออโรโทลิคีน 2.00 % (w/w)



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 3.00 % (w/w)

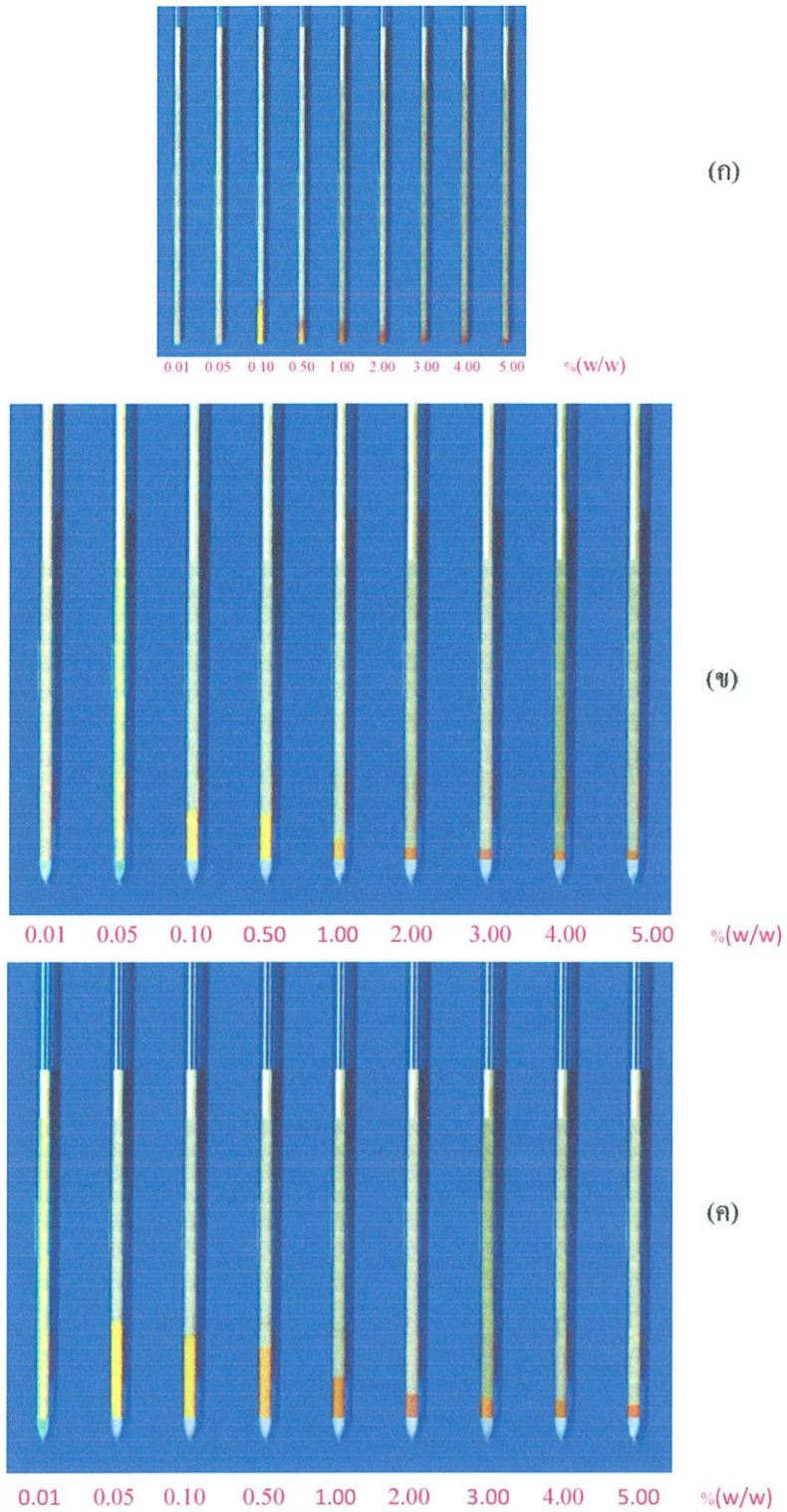


ซิติกา - ออโรโทลิคีน 4.00 % (w/w)



ซิติกา - ออโรโทลิคีน 5.00 % (w/w)

รูปที่ 4.14 ซิติกา - ออโรโทลิคีน 0.01 - 5.00 % (w/w)



รูปที่ 4.15 ลักษณะของหลอดตรวจวัดที่ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบโดยวิธีฉีด (ค)

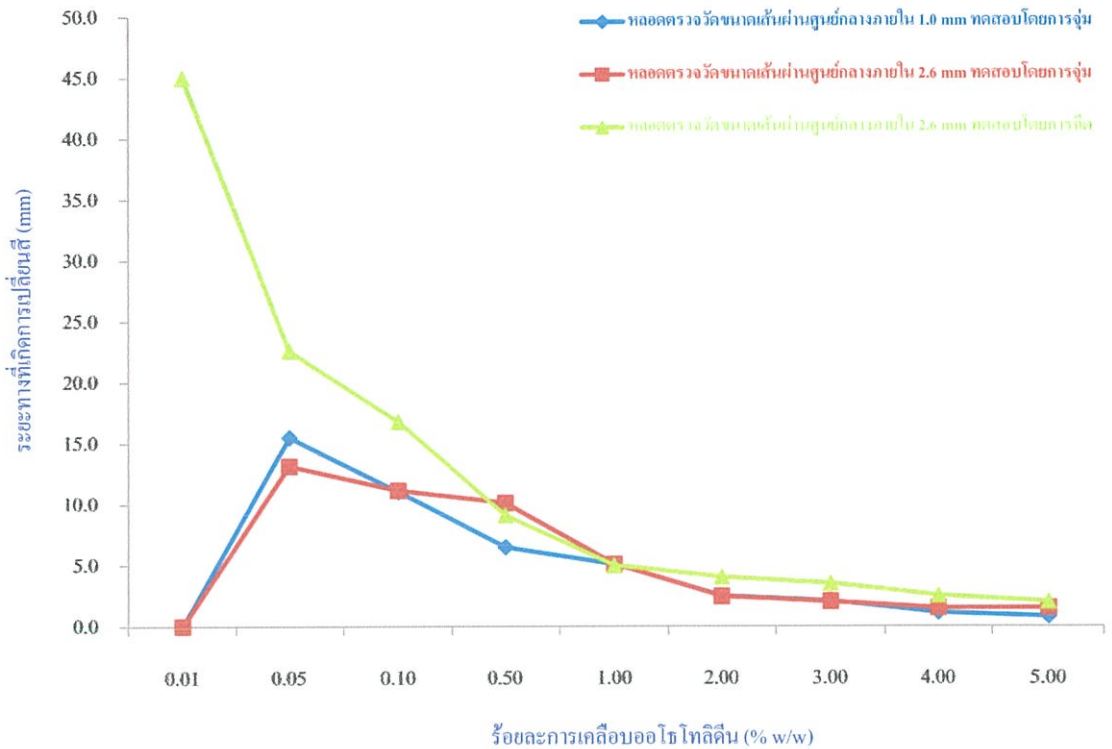
ตารางที่ 4.7 การศึกษาร้อยละการเคลื่อนบอโพลิทีนที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัดโดยทดสอบกับ  
คลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm

ขนาดของ หลอดตรวจวัด (mm.i.d.)	วิธีการ ทดสอบ	ร้อยละการ เคลื่อน (% :w/w)	ค่าทางสถิติ			
			ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ความแปร ปรวน ( $S^2$ )	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของค่าเฉลี่ย ( $S\bar{x}$ )
1.0	จุ่ม	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
		0.05	15.5	0.28	0.53	0.12
		0.10	11.0	0.22	0.47	0.11
		0.50	6.5	0.30	0.55	0.12
		1.00	5.1	0.09	0.29	0.07
		2.00	2.5	0.05	0.23	0.05
		3.00	2.1	0.06	0.24	0.05
		4.00	1.1	0.07	0.26	0.06
2.6	จุ่ม	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
		0.05	13.1	0.08	0.28	0.06
		0.10	11.1	0.08	0.28	0.06
		0.50	10.1	0.04	0.20	0.05
		1.00	5.1	0.06	0.24	0.05
		2.00	2.4	0.03	0.16	0.04
		3.00	2.0	0.00	0.07	0.01
		4.00	1.5	0.01	0.11	0.02
2.6	ฉีด	0.01	45.0	0.21	0.46	0.10
		0.05	22.6	0.20	0.40	0.10
		0.10	16.8	0.17	0.41	0.09
		0.50	9.1	0.15	0.38	0.09
		1.00	5.0	0.07	0.26	0.06
		2.00	4.0	0.07	0.26	0.06
		3.00	3.5	0.11	0.32	0.07
		4.00	2.5	0.08	0.28	0.06
5.00	2.0	0.00	0.00	0.00		

เมื่อนำหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยการจุ่มและเวลาในการตรวจวัด 10 นาที จะเห็นว่าหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.01 % (w/w) จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเลย ส่วนหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองแต่ไม่ชัดเจน และหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.10 – 5.00 % (w/w) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเฉลี่ยที่มากที่สุดคือ หลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.10 % (w/w) โดยหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 mm เท่ากับ 11.0 mm และหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm เท่ากับ 11.1 mm ตามลำดับ ดังนั้นร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm โดยทดสอบแบบจุ่ม คือ 0.10 % (w/w)

เมื่อนำหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยการฉีดด้วยปริมาตร 0.5 mL แล้ววัดระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีทันทีจะเห็นว่าหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.01 % (w/w) จะมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวเป็นสีเหลืองแต่ไม่ชัดเจน และหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.05 – 5.0 % (w/w) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเฉลี่ยที่มากที่สุดคือหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) มีค่าเท่ากับ 22.6 mm ดังนั้นร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีนที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมหลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm โดยทดสอบแบบฉีด คือ 0.05 % (w/w)

จากการนำค่าเฉลี่ยของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีและร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีน จากตารางที่ 4.7 มาพลอตกราฟ ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า การตรวจวัดด้วยวิธีการจุ่มทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ได้ระยะทางการเปลี่ยนสีที่ใกล้เคียงกันที่ร้อยละการเคลือบเท่ากัน แต่การตรวจวัดโดยวิธีการฉีดคลอรีนอิสระเข้าสู่หลอดตรวจวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm ได้ระยะทางการเปลี่ยนสีเฉลี่ยสูงกว่าวิธีจุ่ม และร้อยละการเคลือบออโรโทลิดีนที่ 0.05 % (w/w) ให้ระยะทางการเปลี่ยนสีสูงที่สุด



**รูปที่ 4.16** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการเคลือบอโซโทลิคีนกับระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัด โดยทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm

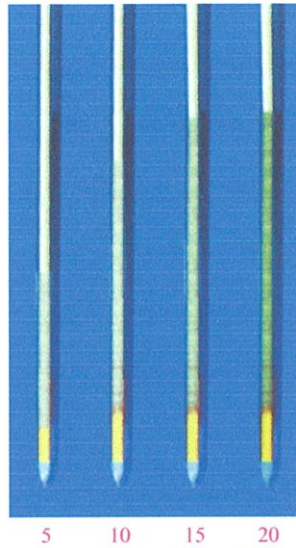
#### 4.1.3.2 ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัด

จากการนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – อโซโทลิคีน 0.10 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยการจุ่มด้วยเวลาในการตรวจวัด 5, 10, 15 และ 20 นาที และหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – อโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยการฉีดด้วยปริมาตร 0.5 mL เวลาในการตรวจวัด 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที แล้ววัดระยะเวลาการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 และตารางที่ 4.8



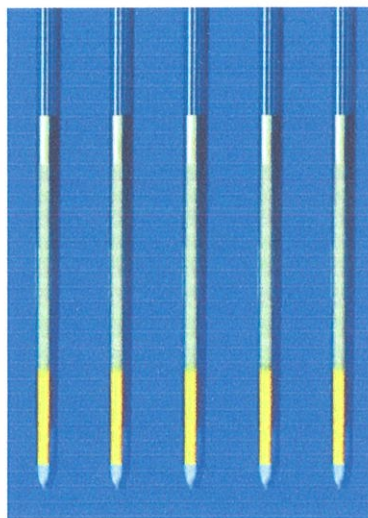
(ก)

นาที



(ข)

นาที



(ค)

1 2 3 4 5 นาที

รูปที่ 4.17 ลักษณะของหลอดตรวจวัดที่ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในเวลาการตรวจวัดต่างๆ ทั้ง 3 แบบคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีจุ่ม (ก และ ข) กับ 2.6 mm ทดสอบ โดยวิธีฉีด (ค)

ตารางที่ 4.8 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัดของหลอดตรวจวัด โดยทดสอบกับ  
คลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm

เวลา (นาที)	ค่าเฉลี่ยของระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสี (mm)		
	ทดสอบโดยการจุ่ม [0.10 % (w/w)]		ทดสอบโดยการฉีด [0.05 % (w/w)]
	ขนาด 1.0 (mm.i.d.)	ขนาด 2.6 (mm.i.d.)	ขนาด 2.6 (mm.i.d.)
1	-	-	22.3
2	-	-	22.4
3	-	-	22.4
4	-	-	22.5
5	8.0	7.7	22.5
10	11.2	11.1	-
15	11.3	11.1	-
20	11.3	11.2	-

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิดิก – ออโรโทลิดีน 0.10 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.0 และ 2.6 mm และทดสอบโดยวิธีการจุ่มพบว่าที่เวลาการตรวจวัด 5 – 10 นาที คลอรีนอิสระจะค่อยๆ ทำปฏิกิริยากับซัลฟิดิก – ออโรโทลิดีนไปตามระยะทางการซึมของสารละลาย ทำให้ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่ในเวลา 10 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่เหมาะสมเพราะถ้าหลังจาก 5 นาที คลอรามินซึ่งเป็นสารบกวนการตรวจวัดสามารถทำปฏิกิริยากับออโรโทลิดีนเกิดสารฮาโลควิโนนซึ่งมีสีเหลือง ทำให้ระยะทางการเปลี่ยนสีสูงและส่งผลให้การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่ได้มากกว่าความเป็นจริง

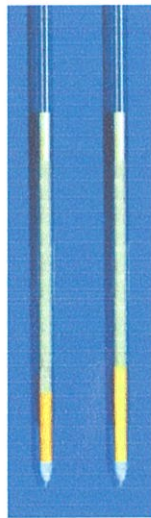
เมื่อนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิดิก – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm โดยการฉีดด้วยปริมาตร 0.5 mL แล้ววัดระยะเวลาการเปลี่ยนสีด้วยเวลาในการตรวจวัด 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที จะเห็นว่าคลอรีนอิสระจะทำปฏิกิริยากับซัลฟิดิก – ออโรโทลิดีนได้ทันทีภายในเวลา 1 นาที และเมื่อเพิ่มเวลาในการตรวจวัดเป็น 2, 3, 4 และ 5 นาทีพบว่าระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีก็ไม่เพิ่มขึ้นแสดงว่าคลอรีนอิสระทำปฏิกิริยากับออโรโทลิดีนจนหมดโดยทันที ดังนั้นเวลาในการตรวจวัดคลอรีนอิสระด้วยหลอดหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิดิก – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) ด้วยวิธีการฉีดจะไม่เกิดการบกวนจากสารคลอรามิน

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกที่จะเตรียมหลอดตรวจวัดที่บรรจุซัลฟิดิก – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm และทดสอบโดยวิธีการฉีดเพราะใช้เวลาในการตรวจวัดเร็วคือประมาณ 1 นาที หรือน้อยกว่า เพราะสามารถอ่านค่าความเข้มข้นได้ทันทีหลังจากที่ฉีดสารตัวอย่าง

เข้าไปในหลอดจนหมดแล้ว นอกจากนี้ร้อยละการเคลื่อนของไอโอดีนก็ยิ่งน้อยกว่า และไม่มีการรบกวนของคลอรามินในขณะที่ทำการตรวจวัดด้วย และยังสามารถควบคุมปริมาณของสารที่ต้องการตรวจวัดให้เข้าไปในหลอดได้ง่ายกว่าอีกด้วย

#### 4.1.3.3 ศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัด

เมื่อนำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm มาทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ที่ปรับ pH (ประมาณ 1 – 2) และไม่ปรับ pH (10.05) โดยวิธีการฉีดด้วยปริมาตร 0.5 mL แล้ววัดระยะเวลาการเปลี่ยนสีทันที ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.9 พบว่าระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนสีเฉลี่ยของการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่ไม่ปรับ pH มีค่ามากกว่าที่ปรับ pH ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าในการเตรียมคลอรีนอิสระที่ปรับ pH ประมาณ 1 – 2 คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูป  $Cl_2$  ซึ่งสามารถระเหยสู่บรรยากาศและยังมีการปั่นกววนหรือเขย่าในขณะที่ทำการเตรียมก็จะทำให้คลอรีนอิสระระเหยหรือสลายตัวได้เร็วขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้สภาวะในการทดลองโดยไม่ปรับ pH ของสารตัวอย่างเพราะการปรับ pH ของสารตัวอย่างให้เป็นกรดนอกจากจะได้ระยะเวลาที่เกิดการเปลี่ยนสีน้อยกว่าที่ไม่ปรับ pH แล้วยังมีความยุ่งยากกว่า และสิ้นเปลืองสารเคมีอื่นๆ อีกด้วย



pH 1.79 10.05

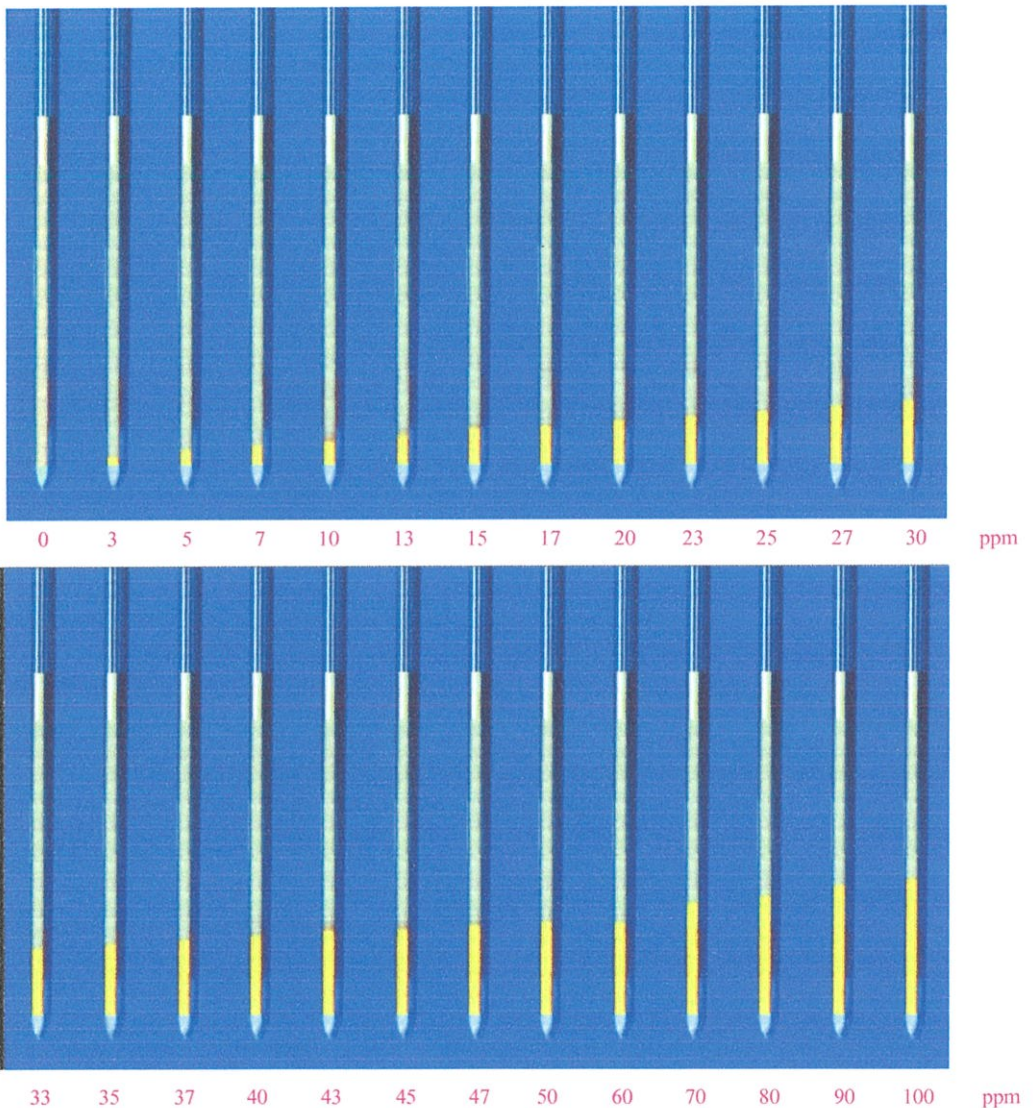
**รูปที่ 4.18** ลักษณะของหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในสภาวะที่ปรับ pH (1.79) และ ไม่ปรับ pH (10.05) โดยทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm

ตารางที่ 4.9 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ของ  
 หลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิตีน 0.05 % (w/w)

ค่าทางสถิติ	สภาวะในการตรวจวัด	
	ปรับ pH (ประมาณ 1 – 2)	ไม่ปรับ pH (10.05)
ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	16.1	22.2
ความแปรปรวน ( $S^2$ )	0.20	0.07
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)	0.45	0.26
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ( $S\bar{x}$ )	0.10	0.06

#### 4.1.3.4 ศึกษาการระบุ geltax ว่างหลอดตรวจวัดเพื่อระบุ geltax ตามความเข้มข้น

จากการที่นำหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm มาตรวจวัดคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 17, 20, 23, 25, 27, 30, 33, 35, 37, 40, 43, 45, 47, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 ppm โดยการฉีดสารละลายแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 0.5 mL แล้ววัดระยะทางการเปลี่ยนสีทันที ผลการตรวจวัดแสดงดังในรูปที่ 4.19 และตารางที่ 4.10 จากการตรวจวัดจะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของคลอรีนอิสระเพิ่มขึ้น ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีก็เพิ่มตามด้วย

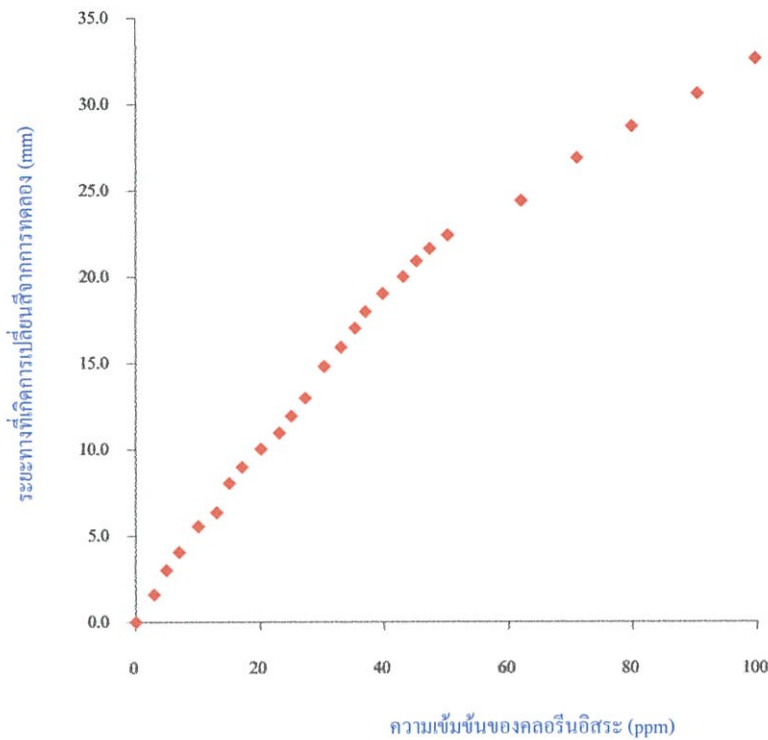


**รูปที่ 4.19** ลักษณะการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิดีน 0.05 % (w/w) เมื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm

ตารางที่ 4.10 ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 %  
(w/w) เมื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm

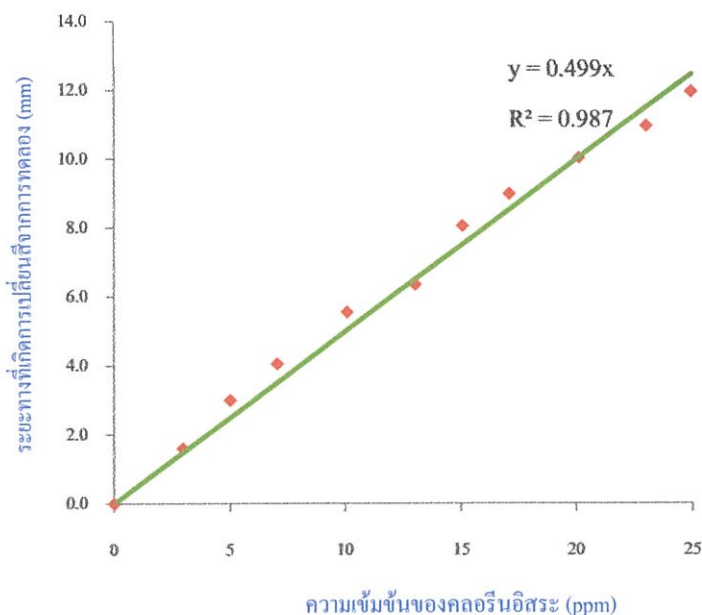
ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียม (ppm)	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่ตรวจวัดด้วยวิธียูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)	ระยะทางเฉลี่ยที่เกิดการเปลี่ยนสี (mm)
0.00	0.00	0.0
3.00	2.98	1.6
5.00	5.00	3.0
7.00	7.02	4.1
10.00	10.08	5.6
13.00	13.03	6.4
15.00	15.04	8.1
17.00	17.05	9.0
20.00	20.10	10.0
23.00	23.00	11.0
25.00	24.89	11.9
27.00	27.11	13.0
30.00	30.20	14.8
33.00	32.90	15.9
35.00	35.19	17.0
37.00	36.88	18.0
40.00	39.74	19.0
43.00	43.05	20.0
45.00	45.21	20.9
47.00	47.31	21.6
50.00	50.23	22.4
60.00	61.92	24.4
70.00	70.93	26.9
80.00	79.82	28.7
90.00	90.32	30.6
100.00	99.57	32.6

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.10 มาพลอตกราฟระหว่างระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีกับความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่ตรวจวัดได้จากวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.20 และเมื่อประเมินความเป็นเส้นตรงของเส้นกราฟที่พลอตขึ้นด้วยสายตาพบว่าช่วงของความเข้มข้นจะอยู่ในช่วงความเข้มข้น 0 – 50 ppm แต่เนื่องจากระดับความเข้มข้นมาตรฐานที่ยอมรับของปริมาณของคลอรีนอิสระที่มีอยู่ในน้ำของสระว่ายน้ำจะมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 3 – 4 ppm ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกความเข้มข้นในช่วง 0 – 25 ppm เพื่อนำมาระบุสเกลความเข้มข้นของหลอดตรวจวัด



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – อโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm

เมื่อนำคลอรีนอิสระความเข้มข้นในช่วง 0 – 25 ppm มาพลอตกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเข้มข้นของคลอรีนอิสระกับระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสี ได้สมการเส้นตรงคือ  $y = 4.99x$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.987 ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เมื่อนำความเข้มข้น 0, 3, 5, 7, 10, 13, 15, 17, 20, 23 และ 25 (x) มาแทนค่าในสมการ  $y = 4.99x$  จะได้ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสี (y) จากการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงช่วงของความเป็นเส้นตรงของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ความเข้มข้น 0 – 25 ppm

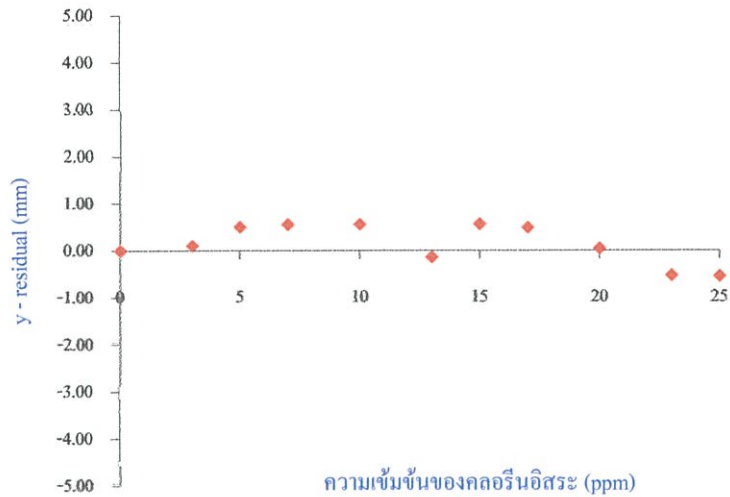
ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของหลอดตรวจวัดจากการทดลอง และการคำนวณด้วยสมการ  $y = 0.499x$

ความเข้มข้นของ คลอโรฟิลล์ (ppm)	ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ที่ตรวจวัด ด้วยวิธียูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสี (mm)	
		จากการทดลอง	จากการคำนวณ
0.00	0.00	0.0	0.0
3.00	2.98	1.6	1.5
5.00	5.00	3.0	2.5
7.00	7.02	4.1	3.5
10.00	10.08	5.6	5.0
13.00	13.03	6.4	6.5
15.00	15.04	8.1	7.5
17.00	17.05	9.0	8.5
20.00	20.10	10.0	10.0
23.00	23.00	11.0	11.5
25.00	24.89	11.9	12.5

เมื่อนำผลการตรวจวัดคลอรีนอิสระในช่วงความเข้มข้น 0 – 25 ppm มาหาค่าความแตกต่างระหว่างระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้จากการทดลองและระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีที่ได้จากการคำนวณหรือหาค่า  $y - residual$  ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12 เมื่อนำมาพลอตกราฟเพื่อดูการกระจายของค่า  $y - residual$  รอบๆ ค่าศูนย์เพื่อยืนยันความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของกราฟเส้นตรงจากรูปที่ 4.21 ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าความสัมพันธ์ของกราฟจากรูปที่ 4.21 เป็นเส้นตรงจริงเพราะจากรูปที่ 4.22 มีการกระจาย  $y - residual$  อยู่รอบๆ ค่าศูนย์ ได้ช่วงของสเกลของหลอดตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 4.13 และหลอดตรวจวัดมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.12 แสดง  $y - residual$  ของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0–25 ppm

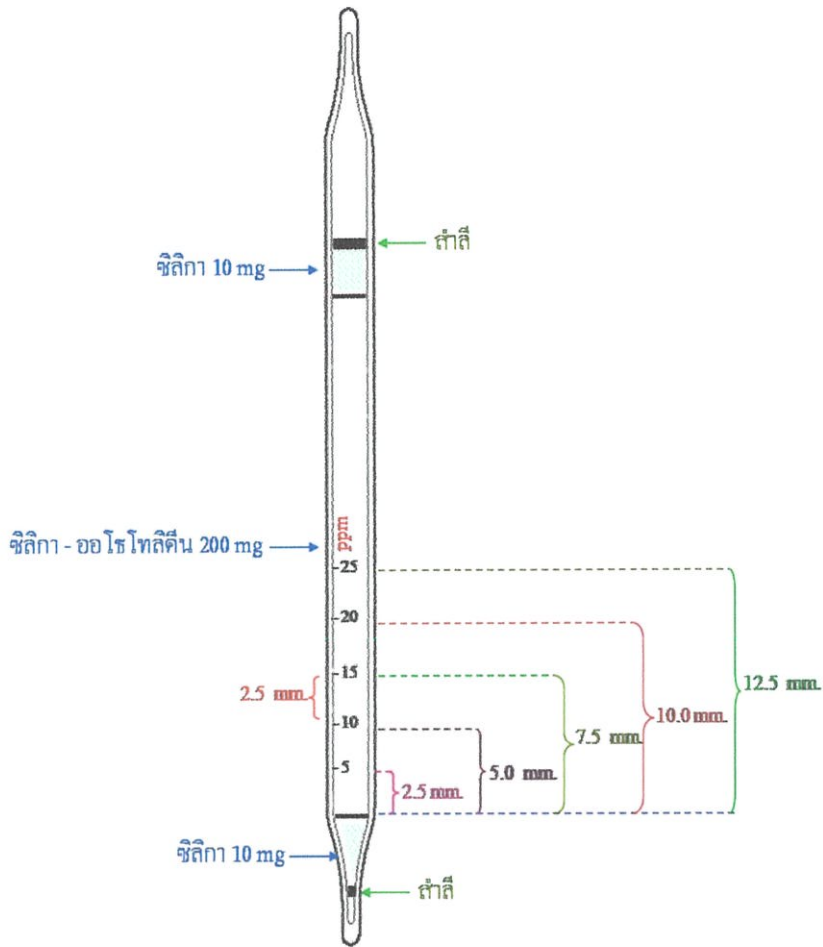
ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสี (mm)		$y - residual$ (mm)
	จากการทดลอง	จากการคำนวณ	
0.00	0.0	0.0	0.00
3.00	1.6	1.5	0.10
5.00	3.0	2.5	0.51
7.00	4.1	3.5	0.56
10.00	5.6	5.0	0.56
13.00	6.4	6.5	-0.14
15.00	8.1	7.5	0.57
17.00	9.0	8.5	0.49
20.00	10.0	10.0	0.04
23.00	11.0	11.5	-0.53
25.00	11.9	12.5	-0.54



รูปที่ 4.22 กราฟแสดง y-residual ของหอดตรวจวัดในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0–25 ppm

ตารางที่ 4.13 ช่วงสเกลของหอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโซโทลิคีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสี (mm)	ช่วงความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	ระยะห่าง (mm)
5.00	2.5	0.00 – 5.00	2.5
10.00	5.0	5.00-10.00	2.5
15.00	7.5	10.00-15.00	2.5
20.00	10.0	15.00-20.00	2.5
25.00	12.5	20.00-25.00	2.5



รูปที่ 4.23 ลักษณะของหลอดตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์

#### 4.1.4 การทดสอบความถูกต้องของวิธีของหลอดตรวจวัด

##### 4.1.4.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานคลอโรฟิลล์

เมื่อนำหลอดตรวจวัดมาทดสอบประสิทธิภาพด้วยคลอโรฟิลล์ที่เตรียมขึ้นจากสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ความเข้มข้น 0, 3, 5, 7, 10, 15, 20 และ 25 ppm ได้ค่าช่วงความเชื่อมั่น (confident interval :CI) ของคลอโรฟิลล์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และองศาความอิสระ (degree of freedom ; V) เท่ากับ 9 ดังแสดงในตารางที่ 4.14

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดคลอโรฟิลล์ที่เตรียมขึ้นกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรีด้วยการทดสอบสมมติฐานของการเท่ากันของค่าเฉลี่ย หรือ t - test (paired t - test) โดยใช้สมมติฐานแบบสองหาง (two tailed test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ระดับนัยสำคัญ 0.05) องศาความอิสระเท่ากับ 9 พบว่าค่าเฉลี่ยของวิธีการตรวจวัดคลอโรฟิลล์

ที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ( $t_{cal} = -2.262$  ถึง  $+2.262$ )

จากการเปรียบเทียบความเที่ยงของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีของการเท่ากันของความแปรปรวน หรือ F-test โดยใช้สมมติฐานแบบทางเดียวทางขวามือ (one tailed test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % องศาความอิสระเท่ากับ 9 พบว่าค่าความแปรปรวนของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.14 ( $F_{cal} < 3.18$ )

เมื่อเปรียบเทียบการทวนซ้ำ (repeatability) ของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดโดยทำการตรวจวัด 10 ซ้ำในแต่ละความเข้มข้นในเวลาใกล้เคียงกัน จะสามารถคำนวณ %RSD<sub>r</sub> ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ซึ่งเมื่อนำ %RSD<sub>r</sub> มาคำนวณโดยใช้ Horwitz's equation จะได้ค่า HORRAT ที่น้อยกว่า 2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ( $HORRAT_{AOAC} < 2$ )

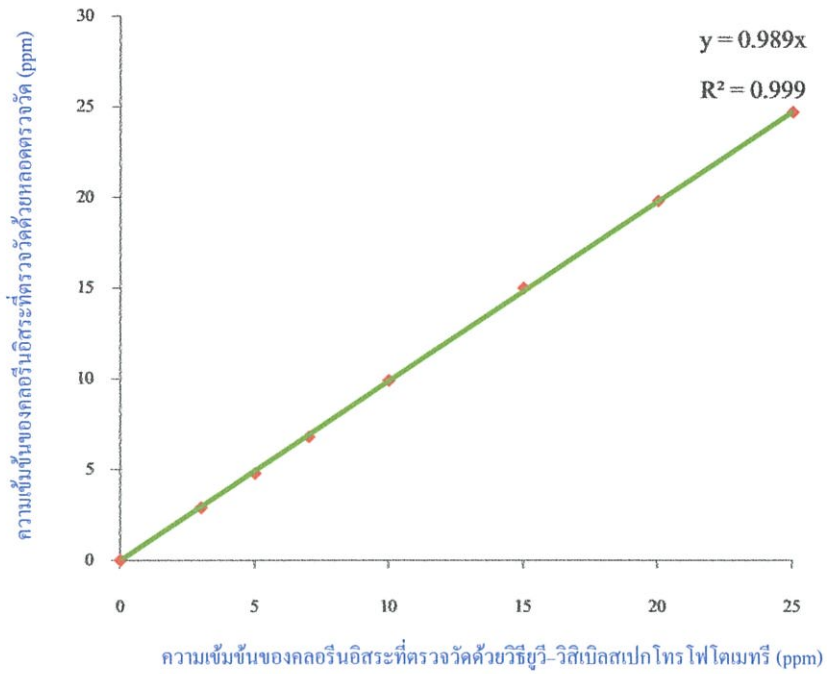
ตารางที่ 4.14 ช่วงความเชื่อมั่น t-test และ F-test ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น (ppm)	วิธีการทดสอบทางสถิติ		
	ช่วงความเชื่อมั่น (ppm)	t-test : $t_{cal}$	F-test : $F_{cal}$
0	0 ± 0.0	-1.633	0.00
3	2.9 ± 0.2	-1.541	2.92
5	4.8 ± 0.3	-1.255	2.97
7	6.8 ± 0.3	-2.261	2.95
10	9.9 ± 0.2	-1.363	3.12
15	15 ± 0.3	0.096	3.12
20	19.8 ± 0.3	-1.364	2.83
25	24.7 ± 0.3	-1.881	2.88

ตารางที่ 4.15 แสดง Horwitz's equation และ HORRAT เพื่อเปรียบเทียบ %RSD<sub>r</sub> ของการตรวจวัด ปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัด

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น (ppm)	Horwitz's equation และ HORRAT		
	%RSD <sub>r</sub>	%RSD <sub>expected</sub>	HORRAT จากการคำนวณ
0	-	-	-
3	10.9	7.4	1.5
5	8.8	7.6	1.2
7	6.2	8.0	0.8
10	3.2	8.9	0.4
15	3.1	8.9	0.4
20	2.1	9.4	0.2
25	2.0	9.5	0.2

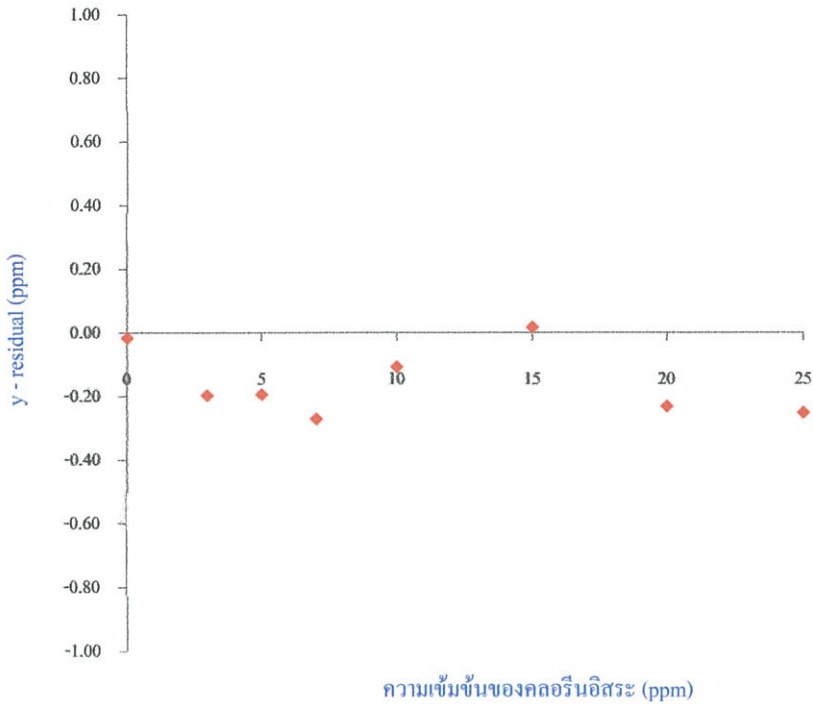
เมื่อนำผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x) กับหลอดตรวจวัด (y) มาพลอตกราฟเพื่อประเมินค่าความเป็นเส้นตรงของกราฟ ได้สมการเส้นตรงคือ  $y = 4.989x$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.999 ดังแสดงในรูปที่ 4.24 แล้วนำผลการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นในช่วงความเข้มข้น 0 – 25 ppm มาหาค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x) และหลอดตรวจวัด (y) เพื่อหาค่า y – residual ดังแสดงในตารางที่ 4.16 และนำค่าที่ได้มาพลอตกราฟเพื่อดูการกระจายของ y – residual รอบๆ ค่าศูนย์ เพื่อยืนยันความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของกราฟจากรูปที่ 4.24 จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.25 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของกราฟจากรูปที่ 4.24 มีความเป็นเส้นตรงจริงเพราะจากกราฟดังแสดง ในรูปที่ 4.25 มีการกระจายของ y – residual อยู่รอบๆ ค่าศูนย์ ซึ่งหมายความว่า การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัด ไม่แตกต่างกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงช่วงของความเป็นเส้นตรงของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัด (y) กับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x)

ตารางที่ 4.16 แสดง y – residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น (ppm)	วิธีการตรวจวัด		y – residual (ppm)
	หลอดตรวจวัด (ppm)	ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)	
0	0	0.016	-0.016
3	2.9	3.096	-0.196
5	4.8	4.993	-0.193
7	6.8	7.070	-0.27
10	9.9	10.007	-0.107
15	15	14.983	0.017
20	19.8	20.031	-0.231
25	24.7	24.951	-0.251



รูปที่ 4.25 กราฟแสดง y – residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

#### 4.1.4.2 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample

เมื่อนำหลอดตรวจวัดมาทดสอบประสิทธิภาพด้วยคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยเติมคลอรีนอิสระด้วยความเข้มข้น 0, 3, 5, 7, 10, 15 และ 20 ppm ลงในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้ค่าช่วงความเชื่อมั่นของคลอรีนอิสระที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และองศาความอิสระเท่ากับ 9 ดังแสดงในตารางที่ 4.17

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัดในการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีด้วยการทดสอบสมมุติฐานของการเท่ากันของค่าเฉลี่ยโดยใช้สมมุติฐานแบบสองทาง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % องศาความอิสระเท่ากับ 9 พบว่าค่าเฉลี่ยของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.17 ( $t_{cal} = -2.262$  ถึง  $+2.262$ )

เมื่อเปรียบเทียบความเที่ยงของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีจากการเท่ากันของความแปรปรวน โดยใช้สมมุติฐานแบบทางเดียวทางขวามือ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % องศาความอิสระเท่ากับ 9 พบว่าค่าความแปรปรวนของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.17 ( $F_{cal} < 3.18$ )

ตารางที่ 4.17 ช่วงความเชื่อมั่น t-test และ F-test ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

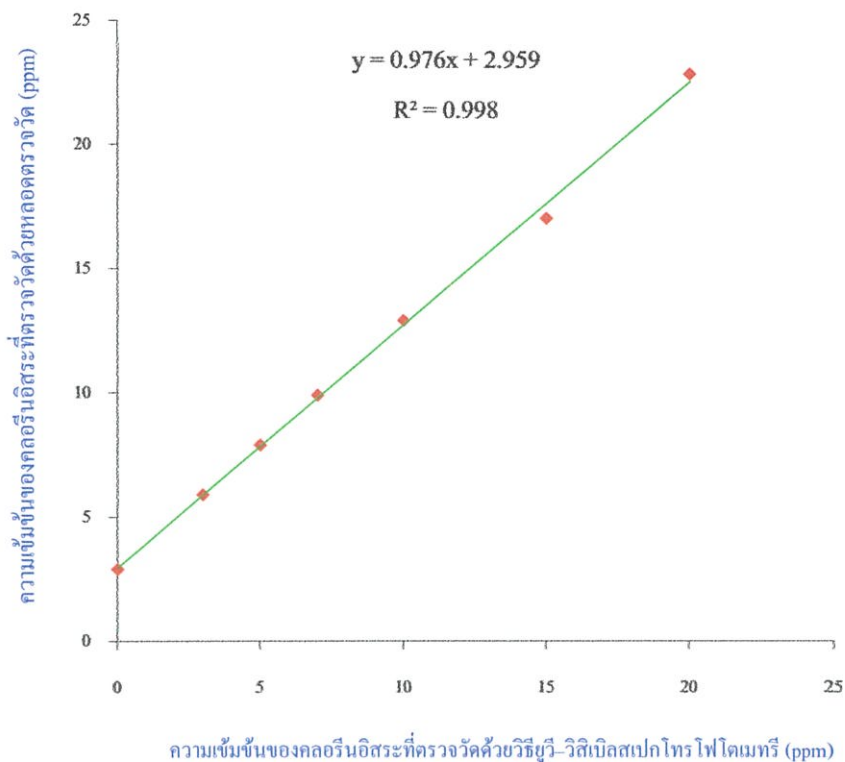
ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติม (ppm)	วิธีการทดสอบทางสถิติ		
	ช่วงความเชื่อมั่น (ppm)	t-test : $t_{cal}$	F-test : $F_{cal}$
0	$2.9 \pm 0.2$	-1.084	2.55
3	$5.9 \pm 0.2$	-1.455	3.14
5	$7.9 \pm 0.2$	-1.353	1.84
7	$9.9 \pm 0.2$	-1.501	2.42
10	$12.9 \pm 0.2$	-1.622	2.40
15	$17.0 \pm 0.3$	-0.271	2.86
20	$22.8 \pm 0.3$	-2.000	1.31

เมื่อเปรียบเทียบการทวนซ้ำของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างด้วยหลอดตรวจวัด โดยทำการตรวจวัด 10 ซ้ำของแต่ละความเข้มข้นในเวลาใกล้เคียงกัน จะสามารถคำนวณ %RSD<sub>r</sub> ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.18 ซึ่งเมื่อนำ %RSD<sub>r</sub> มาคำนวณโดยใช้ Horwitz's equation จะได้ค่า HORRAT ที่น้อยกว่า 2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ( $HORRAT_{AOAC} < 2$ )

ตารางที่ 4.18 แสดง Horwitz's equation และ HORRAT เพื่อเปรียบเทียบ %RSD<sub>r</sub> ของการตรวจวัด ปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัด

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติม (ppm)	Horwitz's equation และ HORRAT		
	%RSD <sub>r</sub>	%RSD <sub>expected</sub>	HORRAT จากการคำนวณ
0	10.9	7.4	1.5
3	5.4	8.2	0.7
5	4.0	8.6	0.5
7	3.2	8.9	0.4
10	2.5	9.2	0.3
15	2.8	9.1	0.3
20	1.8	9.6	0.2

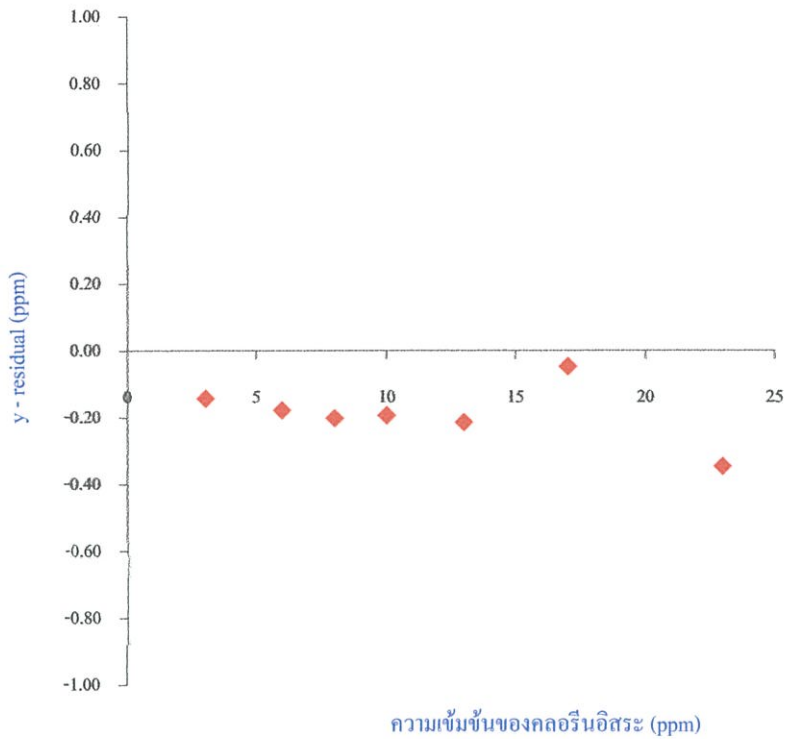
เมื่อนำผลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างโดยตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x) กับหลอดตรวจวัด (y) มาพลอตกราฟเพื่อประเมินค่าความเป็นเส้นตรงของกราฟ ได้สมการเส้นตรงคือ  $y = 0.976x + 2.959$  และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.998 ดังแสดงในรูปที่ 4.26 แล้วนำผลการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างในช่วงความเข้มข้น 0 – 20 ppm มาหาค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างโดยตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x) และหลอดตรวจวัด (y) เพื่อหาค่า  $y - \text{residual}$  ดังแสดงในตารางที่ 4.19 และนำค่าที่ได้มาพลอตกราฟเพื่อดูการกระจายของ  $y - \text{residual}$  รอบๆ ค่าศูนย์ เพื่อยืนยันความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของกราฟในจากรูปที่ 4.26 ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าความสัมพันธ์ของกราฟในจากรูปที่ 4.26 มีความเป็นเส้นตรงจริงเพราะจากกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.27 มีการกระจายของ  $y - \text{residual}$  อยู่รอบๆ ค่าศูนย์ ซึ่งหมายความว่า การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างด้วยหลอดตรวจวัดมีค่าไม่แตกต่างกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงช่วงของความเป็นเส้นตรงของหลอดตรวจวัดในตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัด (y) กับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (x)

ตารางที่ 4.19 แสดง y – residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติม (ppm)	วิธีการตรวจวัด		y – residual (ppm)
	หลอดตรวจวัด (ppm)	ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)	
0	2.9	3.043	-0.14
3	5.9	6.077	-0.18
5	7.9	8.101	-0.20
7	9.9	10.094	-0.19
10	12.9	13.114	-0.21
15	17.0	17.047	-0.05
20	22.8	23.145	-0.35



รูปที่ 4.27 กราฟแสดง y – residual ของการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เติมลงในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

ตารางที่ 4.20 ร้อยละการคืนกลับของการตรวจวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เติมลงในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้หลอดตรวจวัด

ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์หลังจากที่เติมคลอโรฟิลล์ ( $C_1$ : ppm)	ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ตกค้างในน้ำตัวอย่างที่ไม่เติมคลอโรฟิลล์ ( $C_2$ : ppm)	ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ที่เติมในน้ำ ( $C_3$ : ppm)	ร้อยละการคืนกลับ (% recovery)
2.9	2.959	0.00	n.a.
5.9	2.959	3.00	98.0
7.9	2.959	5.00	98.8
9.9	2.959	7.00	99.2
12.9	2.959	10.00	99.4
17.0	2.959	15.00	93.6
22.8	2.959	20.00	99.2

เมื่อหาร้อยละการคืนกลับของการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เติมลงในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้หอดตรวจวัดดังแสดงในตารางที่ 4.20 จะเห็นว่าร้อยละการคืนกลับที่ได้จากการตรวจวัดด้วยหอดตรวจวัดที่เติมคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างความเข้มข้น 0 – 20 ppm อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ ( $\% \text{ recovery}_{\text{AOAC}} = 80$  ถึง  $110 \%$ )

#### 4.1.4.3 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่าง

เมื่อนำหอดตรวจวัดมาทดสอบประสิทธิภาพด้วยคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำ 3 แห่ง คือ สระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สระว่ายน้ำสวนพระนคร และสระว่ายน้ำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคลองหก ได้ค่าช่วงความเชื่อมั่นของคลอรีนอิสระที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และองศาความอิสระเท่ากับ 24 ดังแสดงในตารางที่ 4.21

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหอดตรวจวัดในการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำ 3 แห่ง กับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรีด้วยการทดสอบสมมุติฐานของการเท่ากันของค่าเฉลี่ย โดยใช้สมมุติฐานแบบสองทาง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % องศาความอิสระเท่ากับ 24 พบว่าค่าเฉลี่ยของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำ 3 แห่งด้วยหอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.21 ( $t_{\text{cal}} = -2.064$  ถึง  $+2.064$ )

เมื่อเปรียบเทียบความเที่ยงของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำทั้งสามแห่งด้วยหอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรีจากการเท่ากันของความแปรปรวน โดยใช้สมมุติฐานแบบทางเดียวทางขวามือ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % องศาความอิสระเท่ากับ 24 พบว่าค่าความแปรปรวนของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสามแห่งด้วยหอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.21 ( $F_{\text{cal}} < 1.98$ )

เมื่อเปรียบเทียบการทวนซ้ำ ของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำทั้งสามแห่ง ด้วยหอดตรวจวัดโดยทำการตรวจวัด 25 ซ้ำในแต่ละแหล่งเก็บตัวอย่างน้ำในเวลาใกล้เคียงกัน จะสามารถคำนวณ  $\% \text{RSD}_r$  ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.22 ซึ่งเมื่อนำ  $\% \text{RSD}_r$  มาคำนวณโดยใช้ Horwitz's equation จะได้ค่า HORRAT ที่น้อยกว่า 2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ( $\text{HORRAT}_{\text{AOAC}} < 2$ )

ตารางที่ 4.21 ช่วงความเชื่อมั่น t-test และ F-test ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่างโดยใช้หลอดตรวจวัดเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำ	วิธีการทดสอบทางสถิติ		
	ช่วงความเชื่อมั่น (ppm)	t-test : $t_{cal}$	F-test : $F_{cal}$
สระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	3.0 ± 0.1	-0.655	1.88
สระว่ายน้ำสวนพระนคร	0.0 ± 0.0	-1.845	0.00
สระว่ายน้ำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคลองหก	3.2 ± 0.1	-0.412	1.97

ตารางที่ 4.22 Horwitz's equation และ HORRAT เพื่อเปรียบเทียบ %RSD<sub>r</sub> ของการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระในน้ำตัวอย่าง โดยใช้หลอดตรวจวัด

แหล่งเก็บตัวอย่างน้ำ	Horwitz's equation และ HORRAT		
	%RSD <sub>r</sub>	%RSD <sub>expected</sub>	HORRAT จากการคำนวณ
สระว่ายน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	11.6	7.3	1.6
สระว่ายน้ำสวนพระนคร	-	-	-
สระว่ายน้ำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคลองหก	11.8	7.3	1.6

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่าหลอดตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นและใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ หลอดตรวจวัดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.6 mm ภายในบรรจุด้วยซิลิกา – ออโรโทลิซีน 0.05 % (w/w) ตรวจวัดโดยวิธีฉีดสารตัวอย่างเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งของหลอด ใช้เวลาตรวจวัดประมาณ 1 นาที จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีเหลืองขึ้น โดยความสูงหรือระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนเป็นสีเหลืองจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณคลอรีนอิสระ และจากการศึกษาการตรวจวัดโดยจุ่มหลอดตรวจวัดในสารละลายต้องใช้เวลาในการตรวจวัดนานถึง 10 นาที ซึ่งเป็นเวลานานพอที่จะทำให้คลอรีนเกิดปฏิกิริยากับออโรโทลิซีนและรบกวนการเคลื่อนที่ให้ผลการตรวจวัดคือ 0.10 % (w/w) ซึ่งรบกวนการเคลื่อนที่มากกว่าการตรวจวัดแบบฉีด

การทดสอบความใช้ได้ของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิซีน 0.05 % (w/w) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.6 mm นี้พบว่าจากการตรวจวัด 10 ครั้งในคลอรีนอิสระที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐานแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample และน้ำตัวอย่าง ได้ค่า % RSD, เท่ากับ 2.0 – 10.9 % , 1.8 – 10.9 % และ 11.6 – 11.8 % ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณด้วย Horwitz's equation จะได้ค่า HORRAT น้อยกว่า 2 แสดงว่าหลอดตรวจวัดมีความเที่ยงดีจากการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระใน spiked sample เพื่อทดสอบความแม่นยำด้วยค่าร้อยละกลับ ได้ค่าอยู่ในช่วง 93.6 – 99.4 % และเมื่อทดสอบความถูกต้องของวิธีด้วย t – test และ F – test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการใช้หลอดตรวจวัดและวิธีมาตรฐานยูวี – วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรีพบว่าทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

หลอดตรวจวัดเตรียมขึ้นมีค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงสูง สามารถนำมาตรวจวัดกับน้ำตัวอย่างจริงได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการตรวจวัดคลอรีนอิสระตกค้างกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรีในทางสถิติพบว่าหลอดตรวจวัดมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี และนอกจากนี้หลอดตรวจวัดที่เตรียมขึ้นยังมีข้อดีคือมีขนาดเล็ก สามารถพกพาไปตรวจวัดได้ที่แหล่งน้ำได้เลย ไม่ต้องยุ่งยากในการเก็บน้ำไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ซึ่งทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณของคลอรีนอิสระ

ได้ในช่วงความเข้มข้นถึงระดับ ppm และยังสามารถพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตอุปกรณ์ตรวจวัดใหม่ๆ และผลิตขายในเชิงพาณิชย์ได้อีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในกรณีที่จะผลิตหลอดตรวจวัดในเชิงพาณิชย์นั้นควรจะต้องมีการปรับปรุงในส่วนของวิธีการบรรจุซิลิกาใส่ในหลอดตรวจวัด เช่น ควรมีเครื่องสำหรับบรรจุโดยเฉพาะ เพราะทำให้หลอดตรวจวัดที่ผลิตขึ้นมีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] หนึ่งฤทัย แสแสงสีรุ่ง. “คลอรีน : สารเคมีจำเป็นต่อชีวิต” [Online]. Available: <http://siweb.dss.go.th/doc/fulltext/T48.pdf>. 2006.
- [2] Fisheries.go.th. “**property of chlorine.**” [Online]. Available: <http://www.fisheries.go.th/cf-chan/visit-water-room/chlorine/chlorine-page.htm>. 2006.
- [3] Prapathai.com. “คลอรีนกับน้ำดื่ม.” [Online]. Available: <http://www.prapathai.com/nana/Clorine/clorine.htm>. 2006.
- [4] Mwa.co.th. “ถาม-ตอบ เกี่ยวกับคุณภาพน้ำประปา.” [Online]. Available: <http://www.mwa.co.th/faq8.html>. 2006.
- [5] Waterindex.com. “**COMPLETE Home water Test kit.**” [Online]. Available: <http://www.waterindex.com/doc1-complete1.htm>. 2006.
- [6] C3.org. “**Chlorine - 100 Years of Safety.**” [Online]. Available: [http://www.c3.org/chlorine\\_knowledge\\_center/pools.html](http://www.c3.org/chlorine_knowledge_center/pools.html). 2006.
- [7] Navy.mi.th. “เคมีของสระว่ายน้ำ สิ่งที่คุณควรรู้.” [Online]. Available: [http://www.navy.mi.th/science/Information/Paper/InfoPaper\\_Pond.html](http://www.navy.mi.th/science/Information/Paper/InfoPaper_Pond.html). 2006.
- [8] Larry Katz. “**Chlorine in swimming pool.**” [Online]. Available: [http://www.havuz.org/pool\\_pool/pool\\_maintenance/water\\_testing/chlorine.htm](http://www.havuz.org/pool_pool/pool_maintenance/water_testing/chlorine.htm). 2006.
- [9] Clinicneo.co.th. “คลอรีนศัตรูตัวร้ายสำหรับเส้นผม.” [Online]. Available: [http://www.clinicneo.co.th/detailcolumn.php?col\\_id=88](http://www.clinicneo.co.th/detailcolumn.php?col_id=88). 2006.
- [10] สำนักบริการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. “สารพันความรู้ ผู้วิกฤติ เศรษฐกิจไทย.” [Online]. Available: <http://web.ku.ac.th/agri/fishdec/ofac.html>. 2006.
- [11] กรมควบคุมมลพิษ. “เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS).” [Online]. Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1379#>. 2006.
- [12] Anne E. Egger. “The Silicates.” [Online]. Available: [http://www.visionlearning.com/library/module\\_viewer.php?mid=140&l=&c3=](http://www.visionlearning.com/library/module_viewer.php?mid=140&l=&c3=). 2006.
- [13] Cerij.or.jp “What's **L-column** ?” [Online]. Available: [http://www.cerij.or.jp/06\\_05\\_english/Chromato/En\\_L\\_spec.html](http://www.cerij.or.jp/06_05_english/Chromato/En_L_spec.html). 2006.
- [14] Daniel C. Harris **Quantitative chemical analysis**. 6th ed. New York : W.H. Freeman. c2003. pp. 548-679.

- [15] RPW Scott. **“The Structure of Silica Gel.”** [Online]. Available: <http://www.chromatography-online.org/HPLC/Stationary-Phases/Silica-Gel/Structure/rs44.html>. 2006.
- [16] Chang Raymond. **Chemistry**. 6th ed. Boston, MA : WCB/McGraw-Hill. c1998.
- [17] Michel Prassas. **“Silica Glass from Aerogels.”** [Online]. Available: <http://www.solgel.com/articles/april01/aerog1.htm>. 2006.
- [18] กรมควบคุมมลพิษ. **“เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS).”** [Online]. Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=691>. 2006.
- [19] Gfschemicals.com. **“o-TOLIDINE REAGENT.”** [Online]. Available: <http://www.gfschemicals.com/chemicals/gfschem-1110.asp>. 2006.
- [20] Itcilo.it. **“o-TOLIDINE: International Chemical Safety Cards.”** [Online]. Available: [\[http://www.itcilo.it/english/actrav/telearn/osh/ic/119937.htm](http://www.itcilo.it/english/actrav/telearn/osh/ic/119937.htm). 2006.
- [21] Geocities.com. **“คลอรีน (Chlorine).”** [Online]. Available: [http://www.geocities.com/witit\\_mink/chl.html](http://www.geocities.com/witit_mink/chl.html). 2006.
- [22] Mwa.co.th. **“การฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่มด้วยคลอรีน.”** [Online]. Available: <http://www.mwa.co.th/article.html>. 2006.
- [23] Lenntech.com. **“Chlorine.”** Available: [Online]. <http://www.lenntech.com/water-disinfection/disinfectants-chlorine.htm>. 2006.
- [24] Thekrib.com. **“Chlorine.”** Available: [Online]. <http://www.thekrib.com/Chemistry/cl.html>. 2006.
- [25] กรมควบคุมมลพิษ. **“เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS).”** [Online]. Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=122> . 2006.
- [26] Speclab.com. **“Chemical Fact Sheet Chlorine.”** [Online]. Available: <http://www.speclab.com/elements/chlorine.htm>. 2006.
- [27] Web.njit.edu. **“CHLORINE.”** [Online]. Available: <http://web.njit.edu/~hsieh/ene669/chlorine.html>. 2006.
- [28] Water.ky.gov. **“Chlorine or Chloramine Residual.”** [Online]. Available: <http://www.water.ky.gov/dw/rules/Chlorine+or+Chloramine+Residual.htm>. 2006.
- [29] Safewater.org. **“Residual Free Chlorine Analysis.”** [Online]. Available: <http://www.safewater.org/PublicPrograms/Content/Community%20Chlorine.pdf>. 2006.
- [30] นนทวิทย์ อารีย์ชน. **“ข้อมูลการใช้ยาและสารเคมี.”** [Online]. Available: <http://www.shrimpcenter.com/t-shrimp003.html>. 2006.

- [31] กรมควบคุมมลพิษ. “เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS).” Online Available: <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=122>. 2006.
- [32] Vinythai.co.th “**Electrolysis Unit.**” [Online]. Available: <http://www.vinythai.co.th/aboutvinythai/ourplant/electrolysisunit/0,6862,1823-2-0,00.htm>. 2006.
- [33] Matt Curtis & Erik Johnston. “**Chlorine Disinfection.**” [Online]. Available: <http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/wtprimer/chlorine/chlorine.html>. 2006.
- [34] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. “คลอรีน.” [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%84%E0%B8%A5%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B8%99>. 2006.
- [35] กรรณิการ์ สิริสิงห. เคมีของน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์ พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สถาบันราชภัฏจันทรเกษม. 2544 , 124-156
- [36] มั่นสิน ตันตุลเทศน์. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : แชน. อี 68 แลป. 2540. 13/3 -13/23
- [37] Mwa.co.th. “การกำจัดคลอรีนในน้ำประปา.” [Online]. Available: <http://www.mwa.co.th/download/etc01/chlorine.pdf>. 2006.
- [38] Metrohm.com. “**Total chlorine and residual chlorine (free chlorine).**” [Online] Available: <http://www.metrohm.com/basics/encyc/titration/chlorine.html>. 2006.
- [39] Water.me.vccs.edu. “**Chlorination.**” [Online]. Available: <http://water.me.vccs.edu/courses/ENV149/chlorinationb.htm>. 2006.
- [40] Ext.nodak.edu. “**Treatment Systems for Household Water Supplies : Chlorination.**” [Online]. Available: <http://www.ext.nodak.edu/extpubs/h2oqual/watsys/ae1046w.htm>. 2006.
- [41] Sbcphd.org. “**chlorine residual.**” [Online]. Available: <http://www.sbcphd.org/ehs/Documents/Pool%20maintenance%20pamphlet.pdf>. 2006.
- [42] ส่วนวิจัยและพัฒนาคุณภาพน้ำ กองจัดการคุณภาพน้ำ ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ. “การกำจัดคลอรีน.” [Online]. Available: <http://www.mwa.co.th/download/etc01/chlorine.doc>. 2006.
- [43] Edstrom.com. “**Form chlorine in water.**” [Online]. Available: <http://www.edstrom.com/DocLib/MI4148.pdf>. 2006.
- [44] Edstrom.com. “**Forms of Chlorine in Water.**” [Online]. Available: [http://www.edstrom.com/Resources.cfm?doc\\_id=164](http://www.edstrom.com/Resources.cfm?doc_id=164). 2006.

- [45] Gvrd.bc.ca. “**Chlorine Monitoring and Dechlorinating Techniques Handbook: INTRODUCTION.**” [Online]. Available:  
<http://www.gvrd.bc.ca/water/chlorin/handbkintro.pdf>. 2006.
- [46] Tim Loftus. “**Total Residual Chlorine.**” [Online]. Available:  
<http://www.lagoonsonline.com/laboratory-articles/total-chlorine-residual.htm>. 2006.
- [47] Usace.army.mil. “**THE CHEMISTRY OF CHLORINATION.**” [Online]. Available:  
<http://www.usace.army.mil/publications/armytm/tm5-662/chap6.pdf>. 2006.
- [48] Vdo.kku.ac.th. “**Free Residual Chlorine Measurement.**” [Online]. Available:  
[http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenteruploads/lib/html/1165/Presentation\\_unit3.Offline les/frame.htm#slide0028.htm](http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenteruploads/lib/html/1165/Presentation_unit3.Offline%20les/frame.htm#slide0028.htm). 2006.
- [49] Mwa.co.th. “**การฆ่าเชื้อโรคลินน้ำดื่มด้วยคลอรีน.**” [Online]. Available:  
<http://www.mwa.co.th/download/etc01/chlorine.pdf>. 2006.
- [50] ศิริเพ็ญ ตรีไชยาพร. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- [51] Matt Curtis and Erik Johnston. “**Chlorine Disinfection.**” [Online]. Available:  
<http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/wtprimer/chlorine/chlorine.html>. 2006.
- [52] Solarbee.com. “**Water Quality: monochloramines.**” [Online]. Available:  
<http://www.solarbee.com/literature/BPCC010705.pdf>. 2006.
- [53] Tim Loftus. “**Total Residual Chlorine.**” [Online]. Available:  
<http://www.lagoonsonline.com/laboratory-articles/total-chlorine-residual.htm>. 2006.
- [54] World Health Organization. “**How to measure chlorine residual in water.**” [Online]. Available:  
[http://w3.whosea.org/LinkFiles/List\\_of\\_Guidelines\\_for\\_Health\\_Emergency\\_How\\_to\\_measure\\_chlorine\\_residual.pdf](http://w3.whosea.org/LinkFiles/List_of_Guidelines_for_Health_Emergency_How_to_measure_chlorine_residual.pdf). 2006.
- [55] Emersonprocess.com. “**Free Chlorine Measurement in Drinking Water Treatment.**” [Online]. Available:  
[http://www.emersonprocess.com/raihome/documents/Liq\\_AppData\\_4950-22.pdf](http://www.emersonprocess.com/raihome/documents/Liq_AppData_4950-22.pdf). 2006.
- [56] Randy Holmes. “**chloramines and the reef aquarium.**” [Online]. Available:  
<http://www.reefkeeping.com/issues/2003-11/rhf/feature/index.php>. 2006.

- [57] ศิริชัย เอื้อสุขภักดิ์. “วิกฤติน้ำบาดาลของอุตสาหกรรมฟอกย้อม.” [Online]. Available:  
[\[http://www.thaitextile.org/dataarticle/crisis-water.doc\]](http://www.thaitextile.org/dataarticle/crisis-water.doc). 2006.
- [58] วีระชัย โชควิณญ. เทคนิคการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้านแบคทีเรีย. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์. 2530.
- [59] Lorene Lindsay. “Chlorination.” [Online]. Available:  
[http://www.nesc.wvu.edu/ndwc/articles/OT/FA04/OT\\_Fa04\\_TB.pdf](http://www.nesc.wvu.edu/ndwc/articles/OT/FA04/OT_Fa04_TB.pdf). 2006.
- [60] Consolidatedtreatment.com. “Wastewater Technology Fact Sheet Chlorine Disinfection.” [Online]. Available:  
[http://consolidatedtreatment.com/manuals/Fact\\_sheet\\_chlorine\\_disinfection.pdf](http://consolidatedtreatment.com/manuals/Fact_sheet_chlorine_disinfection.pdf). 2006.
- [61] Doh.wa.gov. “Chlorine Contact Time for Small Water Systems.” [Online]. Available:  
[http://www.doh.wa.gov/ehp/dw/Publications/331-343\\_6-09-06.pdf](http://www.doh.wa.gov/ehp/dw/Publications/331-343_6-09-06.pdf). 2006.
- [62] ชงชัย พรรณสวัสดิ์, อุษา วิเศษสุมน. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2535. 210-217.
- [63] Norweco.com. “CHLORINE (RESIDUAL).” [Online]. Available:  
[http://www.norweco.com/html/lab/test\\_methods/4500ClGfp.htm](http://www.norweco.com/html/lab/test_methods/4500ClGfp.htm). 2006.
- [64] Iccontrols.com. “Residual Chlorine Measurement.” [Online]. Available:  
<http://www.iccontrols.com/files/Free-Chlorine.ppt> . 2006.
- [65] Cdc.gov. “chlorine residual testing.” [Online]. Available:  
[http://www.cdc.gov/safewater/publications\\_pages/chlorineresidual.pdf](http://www.cdc.gov/safewater/publications_pages/chlorineresidual.pdf). 2006.
- [66] World Health Organization. “How to measure chlorine residual in water.” [Online]. Available: [http://wedc.lboro.ac.uk/WHO\\_Technical\\_Notes\\_for\\_Emergencies/11%20-%20How%20to%20measure%20chlorine%20residual.pdf](http://wedc.lboro.ac.uk/WHO_Technical_Notes_for_Emergencies/11%20-%20How%20to%20measure%20chlorine%20residual.pdf). 2006.
- [67] Gvrd.bc.ca. “CHLORINE MONITORING.” [Online]. Available:  
<http://www.gvrd.bc.ca/water/chlorin/hndbkchlormonit.pdf>. 2006.
- [68] Vdo.kku.ac.th. “อันตรายของคลอรีน.” [Online]. Available:  
[http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenteruploads/libs/html/1165/Presentation\\_unit3.files/frame.htm#slide0028.htm](http://vdo.kku.ac.th/mediacenter/mediacenteruploads/libs/html/1165/Presentation_unit3.files/frame.htm#slide0028.htm). 2006.
- [69] C3.org. “Drinking Water Disinfection with.” [Online]. Available:  
[http://c3.org/news\\_center/third\\_party/disinfection.html](http://c3.org/news_center/third_party/disinfection.html). 2006.

- [70] Kanchanapisek.or.th. “**คลอรีน (chlorine).**” [Online]. Available:  
<http://kanchanapisek.or.th/kp1/data/40/pun.html>. 2006.
- [71] Frederick W. Pontius. “**American Water Works Association Denver Colorado.**” [Online].  
 Available: Chlorine: An Effective Public Health Practice. 2006.
- [72] Navy.mi.th. “**เคมีของสระว่ายน้ำ : สิ่งที่ต้องทราบ.**” [Online]. Available:  
[http://www.navy.mi.th/science/Information/Paper/InfoPaper\\_Pond.html](http://www.navy.mi.th/science/Information/Paper/InfoPaper_Pond.html). 2006.
- [73] การประปานครหลวง. “**มาตรฐานคุณภาพน้ำ.**” [Online]. Available:  
<http://www.mwa.co.th/standard.html>. 2006.
- [74] กรมควบคุมมลพิษ. “**มาตรฐานคุณภาพน้ำ.**” [Online]. Available:  
[http://www.pcd.go.th/Info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/Info_serv/reg_std_water04.html). 2006.
- [75] Nextteq.com. “**What is the Detector Tube Method?.**” [Online]. Available:  
<http://www.nextteq.com/products/tubemethod.html>. 2006.
- [76] Anachem.co.uk. “**Gastec systems.**” [Online]. Available:  
<http://www.anachem.co.uk/anachem/instrumentation/gastec.asp>. 2006.
- [77] Gastec.ca. “**type of tube**” [Online]. Available: <http://www.gastec.ca/types.htm>. 2006.
- [78] Gastec.ca. “**Gastec Detector Tube Type.**” [Online].  
<http://www.anachem.co.uk/anachem/instrumentation/gastectubetype.asp>. 2006.
- [79] Nextteq.com. “**Types of Tubes.**” [Online]. Available: <http://www.nextteq.com/products/tubes.html>. 2006.
- [80] Gastec.ca. “**Tube Basics.**” [Online]. Available: <http://www.gastec.ca/basics.htm>. 2006.
- [81] Sensidyne.com. “**Detector Tubes.**” [Online]. Available:  
<http://www.sensidyne.com/prodgroup.php?ID=1>. 2006.
- [82] Gastec.ca. “**Detector Tubes.**” [Online]. Available:  
<http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/explanation1.htm>. 2006.
- [83] Nextteq.com. “**Standard Tubes.**” [Online]. Available:  
<http://www.nextteq.com/products/tubes/explanation1.htm>. 2006.
- [84] Rurki dozymetryczne. “**Dosi-Tubes.**” [Online]. Available:  
<http://www.deltaservice.com.pl/index/F/liste/catID/2155/pID/1096m>. 2006.
- [85] Gastec.ca. “**PYROTEC Pyrolyzer.**” [Online].  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/sa\\_dt/pyrotec.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/sa_dt/pyrotec.htm). 2006.

- [86] Zefon.com. “**Compressed Breathing Air Analysis Kit**” [Online]. Available:  
<http://www.zefon.com/store/customer/product.php?productid=880&cat=192&page=1>. 2006.
- [87] Gastec.ca. “**AirTec tube.**” [Online]. Available:  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/sa\\_dt/airtec\\_tube.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/sa_dt/airtec_tube.htm). 2006.
- [88] Nextteq.com. “**Compressed Air Breathing.**” [Online]. Available:  
<http://www.nextteq.com/products/tubes/airtec.html>. 2006.
- [89] Gastec.ca. “**Tube special features.**” [Online]. Available: <http://www.gastec.ca/tfeatures.htm>
- [90] กรมควบคุมมลพิษ. “**คู่มือการตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อมอย่างง่าย (คุณภาพน้ำ).**” [Online]. Available: [http://www.pcd.go.th/count/waterdl.cfm?FileName=inspect\\_water.pdf](http://www.pcd.go.th/count/waterdl.cfm?FileName=inspect_water.pdf). 2006.
- [91] Nett21.gec.jp. “**Gas Detector Tube System Technology of Air Pollution Continuous Monitoring in JAPAN Examples of simple measurement.**” [Online]. Available:  
[http://nett21.gec.jp/CTT\\_DATA/AMON/CHAP\\_6/html/Amon-154.html](http://nett21.gec.jp/CTT_DATA/AMON/CHAP_6/html/Amon-154.html). 2006.
- [92] Gastec.ca. “**Introduction of Gas Detector Tube.**” [Online]. Available:  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/about\\_dt.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/about_dt.htm). 2006.
- [93] Gastec.ca. “**How to use the Gastec gas detector system.**” [Online]. Available:  
<http://www.gastec.ca/thow.htm> . 2006.
- [94] Komyokk.co.jp. “**Detector Tube.**” [Online]. Available:  
<http://www.komyokk.co.jp/kweb/kenchikan.do?je=1>. 2006.
- [95] Terrauniversal.com. “**Toxic Gas Detector System.**” [Online]. Available:  
<http://www.terrauniversal.com/products/safetyequipment/toxicgasdetsys.php>. 2006.
- [96] Gastec.ca. “**gas detector tube.**” [Online]. Available:  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/dt\\_top.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/dt_top.htm). 2006.
- [97] Nextteq.com. “**The Pump : How to use.**” [Online]. Available:  
[http://www.nextteq.com/products/pump/how\\_to\\_use\\_gv100.htm](http://www.nextteq.com/products/pump/how_to_use_gv100.htm). 2006.
- [98] Skcinc.com. “**Color Diffusion Tubes.**” [Online]. Available: <http://www.skcinc.com/prod/800-01071.asp>. 2006.
- [99] Hazmat. “**detector tube.**” [Online]. [<http://www.westernsafety.com/gastec-2006/gastec2006pg2.html>]. 2006.

- [100] Gastec.ca. “**Introduction of Gas Detector Tube.**” [Online]. Available:  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/about\\_dt.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/about_dt.htm). 2006.
- [101] Nextteq.com. “The Pump : How to use.” [Online]. Available:  
<http://www.nextteq.com/products/pump.html>. 2006.
- [102] Gastec.ca. “**Water Pollutant Detector Tube Systems.**” Online Available:  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/wp\\_dt/wp\\_dt\\_top.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/dt/wp_dt/wp_dt_top.htm). 2006.
- [103] Kin-tek.com. “**WHY THE PERMEATION TUBE METHOD?.**” [Online]. Available:  
<http://www.kin-tek.com/permeat.html>. 2006.
- [104] Gastec.ca. “**Permeator gas generator for calibration.**” [Online]. Available:  
[http://www.gastec.co.jp/english/products/gas%20generation/permeater\\_top.htm](http://www.gastec.co.jp/english/products/gas%20generation/permeater_top.htm). 2006.
- [105] Laqmsupport.org.uk. “**NO<sub>2</sub> Diffusion Tube QA/QC.**” [Online]. Available:  
<http://www.laqmsupport.org.uk/no2qaqc.php>. 2006.
- [106] Gastec.ca. “**Hints for reading tubes.**” [Online]. Available: <http://www.gastec.ca/thints.htm>. 2006.
- [107] Gastec.ca. “**Gastec Air Sampling Pump.**” [Online]. Available:  
<http://www.westernsafety.com/gastec.html>. 2006.
- [108] Gastec.ca. “**Proper storage and disposal.**” [Online]. Available:  
<http://www.gastec.ca/storage.htm>. 2006.
- [109] Gastec.ca. “**Tube Basics.**” [Online]. Available: <http://www.gastec.ca/basics.htm>. 2006.
- [110] ชุติมา ศรีวิบูลย์. การวิเคราะห์โดยเครื่องมือโครมาโทกราฟี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2546.
- [111] พัฒนา เหล่าไพบูลย์. โครมาโทกราฟีแบบของเหลวแรงดันสูง : หลักการและการประยุกต์ใช้  
 ขอนแก่น : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2547.
- [112] Douglas A. Skoog. **Fundamentals of analytical chemistry**. 8th ed, Australia :  
 Thomson/Brooks/Cole, c2004. pp. 906-995.
- [113] Skoog D.A., West, D.M., Holler, and Crouch. **Fundamental of Analytical Chemistry**. 8<sup>th</sup>  
 ed. ,2003
- [114] คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์ เทคนิคการแยกสารเคมี. กรุงเทพฯ : โครงการตำราคณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540

- [115] Adapted from H. M. McNair and E. J. Bonelli. **Basic Gas Chromatography**. Palo Alto, CA: Varian Instrume. 1968.
- [117] พวงแก้ว ลักคนทินพร. **ความรู้พื้นฐานทางลิกวิดโครมาโทกราฟี** กรุงเทพฯ :โครงการตำราคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2540
- [116] David Harvey. **Modern analytical chemistry**. 1<sup>st</sup> ed. Singapore : John Wiley.2000 pp.543-620
- [117] Gary D. Christian. **Analytical chemistry**. 6th ed. Hoboken, NJ : John Wiley. c2004.
- [118] Peter A. Sewell, Brian Clarke and David Kealey **Chromatographic separations**. Singapore : John Wiley, c1991
- [119] D. Jedsadapattarakul. **“Production of high purity silica from rice husk as a solid support for HPLC and GC ”** Thesis for degree of master of science in chemistry, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang. 2004.
- [120] มีศักดิ์ มิตินทวิสมัย และ สีนารถ ชาญณรงค์. **“การพัฒนาเทคนิคเพื่อประยุกต์ใช้ detector tube ในการค้นหาบริเวณที่มีการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินโดยสารอินทรีย์ระเหย.”** [Online]. Available: <http://www.ertc.deqp.go.th>. 2006.
- [121] ภควี สุทธิไวยกิจ **“หลอดตรวจวัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์”**, สาขาเคมีเชิงวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย 50 ถนนพหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900 ประเทศไทย
- [122] Vladimír Pitschmann, Zbyněk Koblíha, Emil Halánek and Ivana Tuarová **“Detector Tube for the Determination of Chlorine in Air,”** Chem. Anal. (Warsaw), Vol. 50, pp.729, 2005.
- [123] Y. Tanaka, T. Nakamoto and T. Moriizumi **“Study of highly sensitive smell sensing system using gas detector tube combined with optical sensor,”** Sensors and Actuators B: Chemical, In Press, Corrected Proof, Available online 9 June 2006.
- [124] I-Fang Mao, Chung-Jung Tsai, Shu-Hung Shen, Tsair-Fuh Lin, Wang-Kun Chen and Mei-Lien Chen, **“Critical components of odors in evaluating the performance of food waste composting plants,”** Science of The Total Environment, In Press, Corrected Proof, Available online 24 July 2006.
- [125] Michael Durand and Bradley J. Scott, **“Geothermal ground gas emissions and indoor air pollution in Rotorua, New Zealand,”** Science of The Total Environment, Vol. 345, pp. 69-801, June 2005.

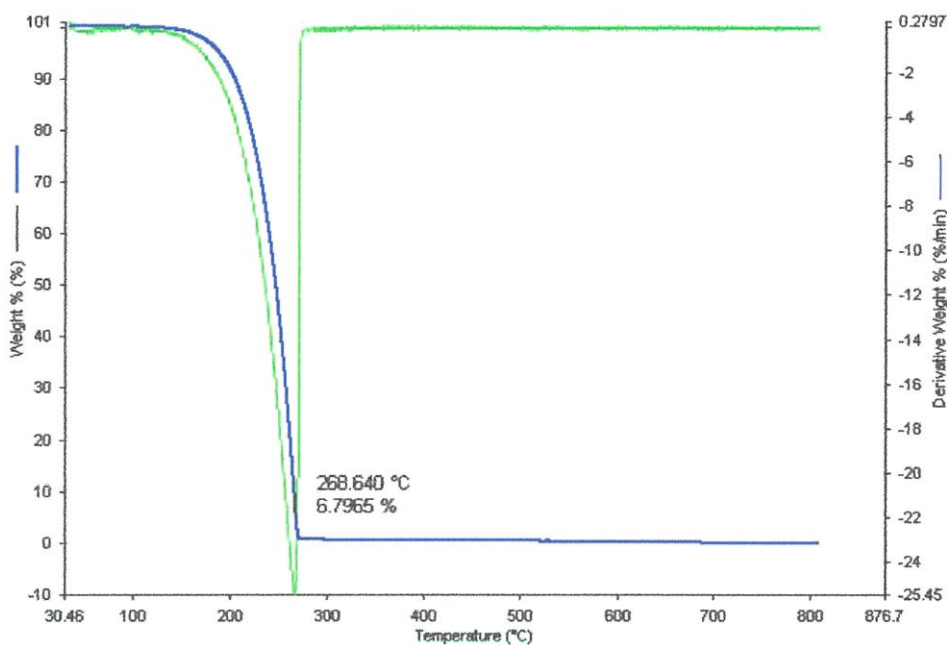
- [126] C. W. Emerson, **“Laboratory and field screening strategies for measuring volatile organic compounds in landfill gas,”** Journal of Environmental Management, Vol. 57, pp. 155-164, November 1999.
- [127] J. G. March, M. Gual and B. M. Simonet, **“Determination of residual chlorine in greywater using o-tolidine,”** Talanta, Vol. 58, pp. 995-1001, November 2000.
- [128] Aki Sakai, Akihito Hemmi, Hiromitsu Hachiya, Fumie Kobayashi, Satoshi Ito, Yasukazu Asano, Toshihiko Imato, Yoshito Fushinuki and Isao Taniguchi, **“Flow injection analysis for residual chlorine using Pb(II) ion-selective electrode detector,”** Talanta, Vol. 45, pp. 575-585, January 1998.
- [129] Mathias Belz, William J.O. Boyle, Karl-F. Klein and Kenneth T.V. Grattan, **“Smart-sensor approach for a fibre-optic-based residual chlorine monitor,”** Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 39, pp. 380-385, March-April 1997.
- [130] S. G. Dmitrienko, O. A. Sviridova, L. N. Pyatkova, V. A. Zhukova and Yu. A. Zolotov, **“Rapid determination of free active chlorine in water by diffuse reflectance spectroscopy after reaction with polyurethane foams,”** Analytica Chimica Acta, Vol. 405, pp. 231-237, 24 January 2000.
- [131] Raquel B.R. Mesquita and António O.S.S. Rangel, **“Gas diffusion sequential injection system for the spectrophotometric determination of free chlorine with o-dianisidine,”** Talanta, Vol. 68, pp. 268-273, 15 December 2005.
- [132] F. Javier Del Campo, Olga Ordeig and F. Javier Muñoz, **“Improved free chlorine amperometric sensor chip for drinking water applications,”** Analytica Chimica Acta, Vol. 554, pp. 98-104, 4 December 2005.
- [133] Fumihiro Kodera, Minoru Umeda and Akifumi Yamada, **“Determination of free chlorine based on anodic voltammetry using platinum, gold, and glassy carbon electrodes,”** Analytica Chimica Acta, Vol. 537, pp. 293-298, 29 April 2000.
- [134] Ludvig Moberg and Bo Karlberg, **“An improved N,N'-diethyl-p-phenylenediamine (DPD) method for the determination of free chlorine based on multiple wavelength detection,”** Analytica Chimica Acta, Vol. 407, pp. 127-133, 29 February 2000.

- [135] Karin Carlsson, Ludvig Moberg and Bo Karlberg, “**The miniaturisation of the standard method based on the N,N'-diethyl-p-phenylenediamine (DPD) reagent for the determination of free or combined chlorine,**” Water Research, Vol. 33, pp. 375-380, February 1999.
- [136] Merck-pigmente.de. “**Standardized Silica Gels.**” [Online]. Available: <http://www.merck-pigmente.de/servlet/PB/menu/1139880/index.html>. 2006.
- [137] Haukka S., Nawrocki J., Ramos M.A. and Rosely B. “**Silica Gels.**” [Online]. Available: <http://sorbtech.com/integrated/default.asp/page=main.asp>. 2006.

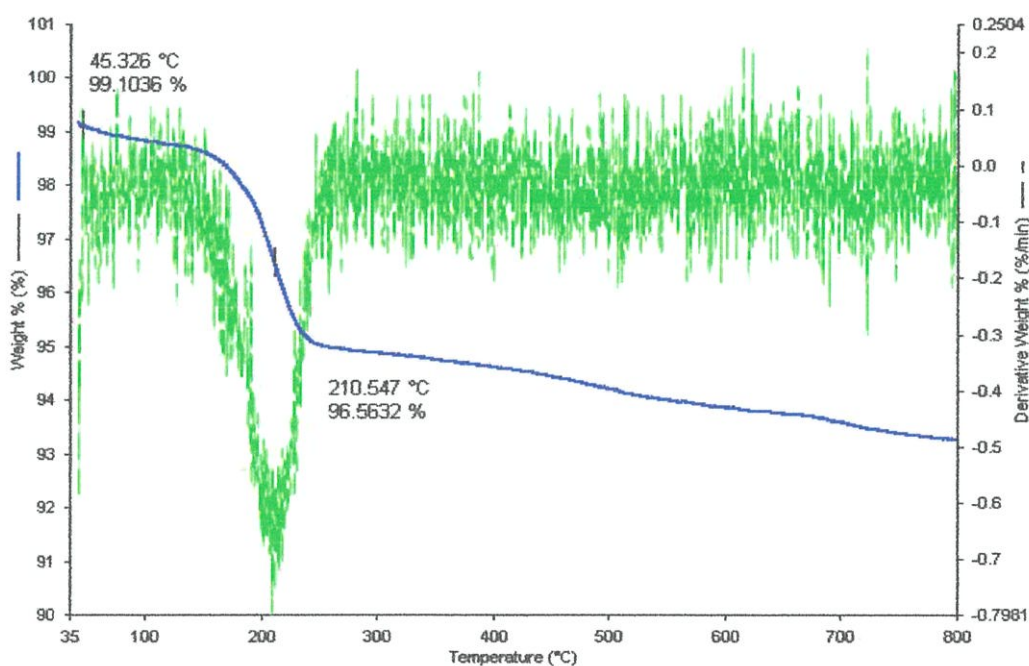
## ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของอโซโทลิตินและซิติกา-อโซโทลิติน  
ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis



รูปที่ ก1 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของอโซโทลิติน โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis



รูปที่ ก2 กราฟการเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกา-อโซโทลิตินร้อยละการเคลือบ 4% โดยวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis

ภาคผนวก ข.

วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคซีลีกาและซีลีกา – ออโซโทลิดีน  
ด้วยเทคนิค light scattering analysis

ตารางที่ ๗1 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว

Size (Lo) ( $\mu\text{m}$ )	Result In (%)	Size (Hi) ( $\mu\text{m}$ )	Result Below (%)
0.05	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.04	1.95	0.05
1.95	0.21	2.38	0.25
2.38	0.56	2.90	0.81
2.90	1.16	3.53	1.97
3.53	2.07	4.30	4.04
4.30	3.28	5.24	7.31
5.24	4.71	6.39	12.03
6.39	6.24	7.78	18.27
7.78	7.53	9.48	25.80
9.48	8.51	11.55	34.31
11.55	9.05	14.08	43.36
14.08	9.15	17.15	52.51
17.15	8.93	20.90	61.45
2.90	8.47	25.46	69.92
25.46	7.83	31.01	77.75
31.01	6.91	37.79	84.66
37.79	5.67	46.03	90.33
46.03	4.21	56.09	94.54
56.09	2.72	66.33	97.27
68.33	1.49	83.26	98.75
83.26	0.65	101.44	99.40
101.44	0.21	123.59	99.61
123.59	0.06	150.57	99.67
150.57	0.06	183.44	99.73
183.44	0.09	223.51	99.82
223.51	0.09	272.31	99.91
272.31	0.07	331.77	99.98
331.77	0.02	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00

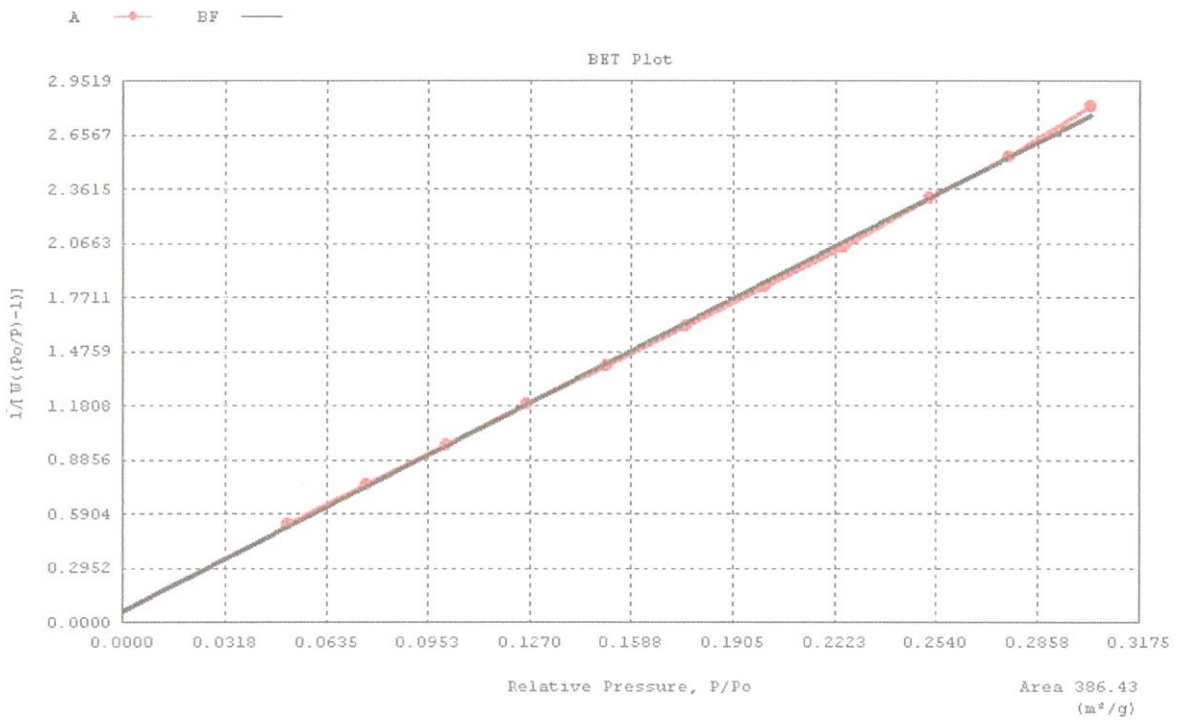
ตารางที่ ข2 การกระจายตัวของอนุภาคซิลิกา – ออโรโทลิคีน ด้วยร้อยละการเคลือบ 0.10 % (w/w)

Size (Lo) ( $\mu\text{m}$ )	Result In (%)	Size (Hi) ( $\mu\text{m}$ )	Result Below (%)
0.05	0.00	1.32	0.00
1.32	0.01	1.60	0.01
1.60	0.07	1.95	0.09
1.95	0.24	2.38	0.32
2.38	0.59	2.90	0.92
2.90	1.21	3.53	2.12
3.53	2.16	4.30	4.28
4.30	3.43	5.24	7.72
5.24	4.97	6.39	12.69
6.39	6.63	7.78	19.32
7.78	8.08	9.48	27.40
9.48	9.16	11.55	36.56
11.55	9.67	14.08	46.23
14.08	9.57	17.15	55.80
17.15	9.01	20.90	64.81
20.90	8.15	25.46	72.79
25.46	7.18	31.01	80.14
31.01	6.08	37.79	86.22
37.79	4.83	46.03	91.05
46.03	3.53	56.09	94.58
56.09	2.31	66.33	96.89
66.33	1.33	83.26	98.22
83.26	0.70	101.44	98.92
101.44	0.38	123.59	99.31
123.59	0.27	150.57	99.57
150.57	0.21	183.44	99.78
183.44	1.14	223.51	99.93
223.51	0.06	272.31	99.00
272.31	0.10	331.77	100.00
331.77	0.00	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00

ภาคผนวก ค.

วิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของ  
อนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวด้วยเครื่อง Autosorb

<b>Sample ID :</b>	SiO <sub>2</sub>				
<b>Description</b>	Ad 20, De 20, BET 11				
<b>Comments</b>					
<b>Sample weight</b>	0.0207 g				
<b>Adsorbate</b>	NITROGEN	<b>Outgas temp</b>	350.0 °C	<b>Operator</b>	Offrie
<b>Cross-Sec Area</b>	16.2 A <sup>2</sup> /molecule	<b>Outgas temp</b>	8.0 hrs	<b>Analysis Time</b>	838.6 min
<b>NonIdeality</b>	6.580E-05	<b>P/Po Toler</b>	0	<b>End of Run</b>	09/15/2006 05:37
<b>Molecular Wt</b>	28.0134 g/mol	<b>Equil Time</b>	3	<b>File Name</b>	490914_1 RAW
<b>Station #</b>	1	<b>Bath Temp.</b>	77.40		

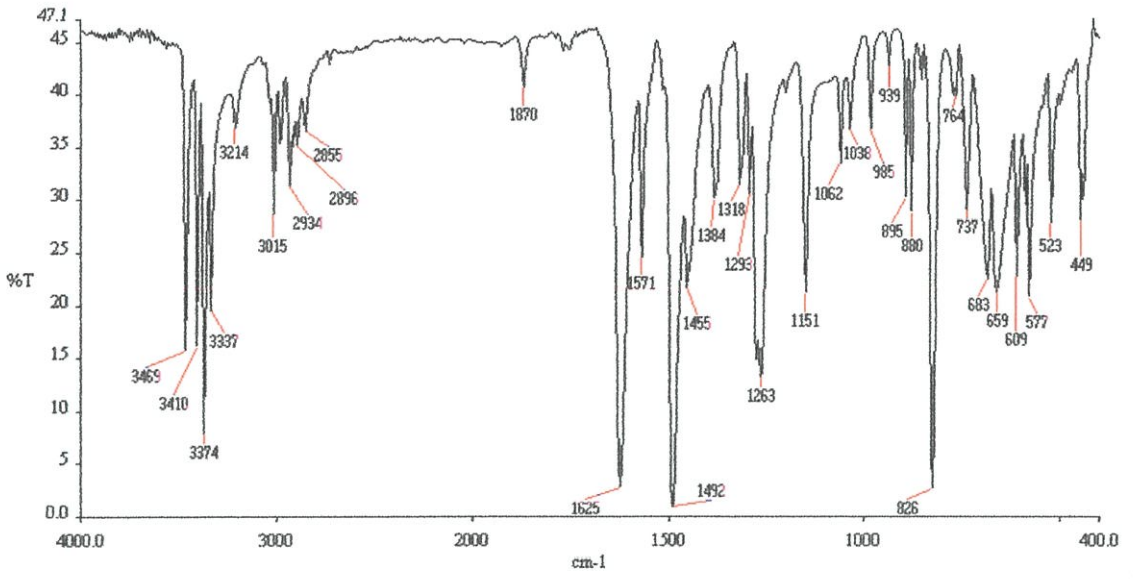


รูปที่ ๓1 Bet plot ของอนุภาคซิลิกาที่เตรียมจากแกลบข้าว โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่องด้วยเครื่อง Autosorb

ภาคผนวก ง.

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอโซโทลิดีน

ด้วยเทคนิค Fourier transforms infrared Spectrometry



รูปที่ ๑1 สเปกตรัม FT-IR ของออโทโทลิดีน

ภาคผนวก จ.

เปรียบเทียบชิลิกาที่เตรียมจากแคลบข้าวกับชิลิกาในทางการค้า

ตารางที่ ๑1 เปรียบเทียบชนิดที่เตรียมจากแคลบข้าวกับชนิดที่เตรียมจากแคลบข้าว [51]

ชนิด	Purity (%)	pH value	Residual water content (%)	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (mL/g)	Bulk Density (g/mL)	Metal traces (ppm)
1. ชนิดที่เตรียมจากแคลบข้าว	99.4	-	-	386.43 m <sup>2</sup> /g	-	-	Na : 3916.3 Mg : 184.9 Al : 1393.1 Ca : 720.7 Cr < 1.4 Mn : 20.5 Fe < 32 Co : 324.4 Ni < 3.5 Cu < 16 Zn : 277.0 Sr : 6.6 Mo < 0.4 Cd < 0.4

ตารางที่ ๑1 (ต่อ)

ชนิด	Purity (%)	pH value	Residual water content (%)	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (mL/g)	Bulk Density (g/mL)	Metal traces
<u>2. Silica Gel Granular</u>							
2.1 Silica Gel, Premium Rf	99.95	6 - 7	5	500	0.8	0.5	Na : 200 ppm Ca : 180 ppm Fe : 34 ppm Mg : 40 ppm
2.2 Silica Gel, Standard Grade							
2.2.1 Silica Gel, Standard Grade – Flash Chromatography & Gravity		6.5-7.5	0.2	500 - 600		63-200µm : & 200- 500µm :0.5	Na : 0.015 % Ca : 0.1 % Fe : 0.005 % SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 0.05 % Al : 0.02 % Cl : 0.002 %

ตารางที่ ๑1 (ต่อ)

ชนิด	Purity (%)	pH value	Residual water content (%)	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (mL/g)	Bulk Density (g/mL)	Metal traces
2.2.2 Silica Gel, Standard Grade - MPLC		7	0.2	500 - 600		12-26µm : 0.4	
2.2.3 Silica Gel, Standard Grade - Active		7	0.2	500 - 600		18-32µm : & 32-63µm : 0.4 63-200µm:0.5	
2.3 Silica Gel, Technical Grade							
<u>3. Silica Gel Spherical</u>							
3.1 Spherical		7.8	6.43	272	0.81	0.51	Na : 298 µg/g Ca : 90 µg/g Fe : 18 µg/g
3.2 Granular		7.5	1.65	281	1.14	0.40	Na : 530 µg/g Ca : 1100 µg/g Fe : 60 µg/g

ตารางที่ จ1 (ต่อ)

ชนิด	Purity (%)	pH value	Residual water content (%)	Specific Surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (mL/g)	Bulk Density (g/mL)	Metal traces
4. <u>Silica Gel Micro Spherical</u>	99.95	< 7	< 2	70Å : 480 100Å : 270 200Å : 130 300Å : 80 500Å : 55 800Å : 45 1000Å : 30	0.8		Na : 65 ppm Ca : 110 ppm Fe : 4 ppm Pb : < 1ppm
5. <u>Silica Bonded Phases</u>							
5.1 Granular	99.8	6 - 7		500	0.8	0.5	
5.2 Spherical	99.8	6 - 7			0.8	0.45	
5.3 Micro Spherical							

ภาคผนวก ฉ.

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัด

ตารางที่ ๑1 การศึกษาร้อยละการเคลื่อนของโพลิทีนที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัดโดยทดสอบกับคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm

ร้อยละการเคลื่อน (% : w/w)	ทดสอบโดยกลุ่ม										ทดสอบโดยกรังด์			
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)					
	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม ( $\bar{s}$ )	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม ( $\bar{s}$ )	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม ( $\bar{s}$ )		
0.01 A	1	n.a.			n.a.				45.0					
	2	n.a.			n.a.				45.0					
	3	n.a.			n.a.				45.5					
	4	n.a.			n.a.				44.0					
	5	n.a.			n.a.				44.0					
	6	n.a.			n.a.				45.0					
	7	n.a.			n.a.				45.0					
	8	n.a.			n.a.				45.0					
	9	n.a.			n.a.				45.0					
	10	n.a.	20	n.a.	n.a.	20	n.a.	n.a.	44.5	20	45.0	45.0		
0.01 B	1	n.a.			n.a.				45.0					
	2	n.a.			n.a.				45.5					
	3	n.a.			n.a.				45.0					
	4	n.a.			n.a.				46.0					
	5	n.a.			n.a.				45.0					
	6	n.a.			n.a.				45.0					
	7	n.a.			n.a.				45.0					
	8	n.a.			n.a.				45.0					
	9	n.a.			n.a.				45.0					
	10	n.a.			n.a.				45.5					

ตารางที่ ๓1 (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ครั้งที่	ทดสอบโดยการจุ่ม										ทดสอบโดยการฉีด					
		หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				ค่าทางสถิติ			
		ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{y}$ )	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{y}$ )	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{y}$ )	
0.05 A	1	15.0	20	15.5	16.0	15.5	13.0	20	13.1	13.0	22.0	20	22.6	22.5	22.5		
	2	14.5					13.2				22.5						
	3	15.0					13.0				22.5						
	4	15.5					13.0				23.0						
	5	16.0					13.0				23.0						
	6	15.0					12.5				22.5						
	7	15.5					13.5				22.5						
	8	15.0					13.2				22.0						
	9	16.0					12.8				22.5						
	10	14.5					13.0				22.0						
0.05 B	1	16.0	20	15.5	16.0	15.5	13.5	20	13.1	13.0	22.5	20	22.6	22.5	22.5		
	2	16.0					13.0				23.0						
	3	15.5					13.0				23.0						
	4	16.0					13.0				22.5						
	5	16.0					13.0				23.0						
	6	16.0					13.5				22.0						
	7	16.0					13.5				23.0						
	8	15.5					13.5				23.0						
	9	15.0					13.0				22.5						
	10	15.5					13.5				22.0						

ตารางที่ ๗1 (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ทดสอบโดยการจุ่ม										ทดสอบโดยการจัด				
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)					หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)					หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				
	ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ
ครั้งที่	เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{x}$ )	เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{x}$ )	เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{x}$ )
0.10 A	1	11.0	20	11.0	11.0	11.0	20	11.1	11.0	11.0	16.5	20	16.8	17.0	17.0
	2	10.5				11.0					16.5				
	3	11.5				11.0					17.0				
	4	12.0				10.5					17.0				
	5	11.0				11.5					17.0				
	6	11.0				11.5					17.0				
	7	11.5				10.9					16.0				
	8	11.5				11.0					17.5				
	9	10.5				11.0					17.0				
	10	11.0				11.2					17.0				
0.10 B	1	11.0	20	11.0	11.0	11.5	20	11.1	11.0	11.0	16.0	20	16.8	17.0	17.0
	2	11.0				11.0					16.0				
	3	12.0				11.0					16.5				
	4	10.5				11.0					17.0				
	5	10.5				11.0					17.0				
	6	11.0				11.5					17.0				
	7	11.0				11.5					17.0				
	8	10.5				11.0					17.0				
	9	10.5				11.0					17.0				
	10	11.0				11.5					16.5				

## ตารางที่ ๓1 (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ทดสอบโดยการจุ่ม												ทดสอบโดยการฉีด			
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)			
	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มีชัยฐาน ( $\bar{y}$ )	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มีชัยฐาน ( $\bar{y}$ )	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มีชัยฐาน ( $\bar{y}$ )	
0.50 A	1	6.0				10.0					9.0					
	2	6.5				10.3					9.0					
	3	7.0				10.0					9.5					
	4	6.0				9.8					9.0					
	5	5.5				10.0					10.0					
	6	6.0				10.3					9.0					
	7	6.0				10.0					9.0					
	8	6.0				10.0					9.0					
	9	5.5				10.2					8.5					
	10	6.0				10.0					9.0					
0.50 B	1	7.0	20	6.5	7.0	6.5					10.0	20	10.1	10.0	10.0	
	2	7.0				10.0					10.0					
	3	6.5				10.0					10.0					
	4	7.0				10.5					10.5					
	5	7.0				10.0					10.0					
	6	7.0				10.0					10.0					
	7	6.5				10.5					10.5					
	8	7.0				10.0					10.0					
	9	7.0				10.5					10.5					
	10	7.0				10.0					10.0					

## ตารางที่ ๓1 (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ทดสอบโดยการจุ่ม												ทดสอบโดยการฉีด			
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)			
	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{x}$ )	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{x}$ )	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\bar{x}$ )	
1.00 A	1	5.0				5.0					5.0					
	2	5.5				5.0					5.0					
	3	4.5				5.2					4.5					
	4	5.0				4.7					5.5					
	5	5.0				5.0					5.0					
	6	5.0				5.5					5.0					
	7	5.5				5.0					5.0					
	8	5.5				5.0					5.0					
	9	5.0				5.2					5.0					
	10	4.5				4.7					5.0					
1.00 B	1	5.5	20	5.1	5.0	5.5	20	5.1	5.0	5.0	20	5.0	5.0	5.0		
	2	5.0				5.0					5.0					
	3	5.0				5.0					5.0					
	4	5.0				5.0					5.0					
	5	5.0				5.0					5.0					
	6	5.0				5.0					5.0					
	7	5.0				5.5					5.0					
	8	5.0				5.0					5.0					
	9	5.0				5.0					5.0					
	10	5.5				5.5					5.0					

ตารางที่ ๗ (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ทดสอบโดยการจุ่ม												ทดสอบโดยการฉีด			
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)							
	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม (x̄)
2.00 A	1	2.5											4.5			
	2	2.5											4.0			
	3	2.5											4.0			
	4	2.0											4.0			
	5	3.0											4.0			
	6	2.5											4.0			
	7	2.5											4.0			
	8	3.0											4.0			
	9	2.5											3.5			
	10	2.0											4.0			
2.00 B	1	2.5	20	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	20	2.4	2.5	2.5	4.0	20	4.0	4.0
	2	2.5											4.5			
	3	2.5											4.5			
	4	2.5											3.5			
	5	2.5											4.0			
	6	2.5											4.0			
	7	2.5											4.0			
	8	2.5											4.0			
	9	2.5											4.0			
	10	2.5											4.0			



ตารางที่ ๓ (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ทดสอบโดยการจุ่ม												ทดสอบโดยการฉีด			
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)			
	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐาน นิยม	มัธยฐาน (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐาน นิยม	มัธยฐาน (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐาน นิยม	มัธยฐาน (x̄)	
4.00 A	1	1.0	20	1.1	1.0	1.5	20	1.5	1.5	1.5	20	1.5	1.5	1.5		
	2	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0			
	3	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	4	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	5	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	6	1.5				1.5		1.5			3.0		3.0			
	7	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	8	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	9	1.5				1.5		1.5			2.5		2.5			
	10	1.0				1.5		1.5			3.0		3.0			
4.00 B	1	1.0	20	1.1	1.0	1.5	20	1.5	1.5	1.5	20	1.5	1.5	1.5		
	2	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0			
	3	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	4	1.0				1.5		1.5			3.0		3.0			
	5	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0			
	6	1.5				1.5		1.5			2.5		2.5			
	7	1.5				1.5		1.5			2.5		2.5			
	8	1.0				1.0		1.0			2.5		2.5			
	9	1.0				1.5		1.5			2.5		2.5			
	10	1.5				1.5		1.5			2.5		2.5			

ตารางที่ ฅ1 (ต่อ)

ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ทดสอบโดยการจุ่ม												ทดสอบโดยการฉีด			
	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)			
	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน (x̄)	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งของ การตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน (x̄)	
5.00 A	1	1.5	20	0.8	0.5	1.5	20	1.5	1.5	1.5	20	1.5	1.5	1.5	2.0	
	2	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	3	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	4	1.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	5	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	6	1.5				1.3		1.5			2.0		2.0		2.0	
	7	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	8	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	9	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	10	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
5.00 B	1	0.5	20	0.8	0.5	1.5	20	1.5	1.5	1.5	20	1.5	1.5	1.5	2.0	
	2	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	3	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	4	1.0				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	5	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	6	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	7	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	8	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	9	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	
	10	0.5				1.5		1.5			2.0		2.0		2.0	

ตารางที่ ๑๒ การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลิคีน 0.10 % (w/w) ในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ 50 ppm ทดสอบโดยการจุ่ม

เวลา (นาที)	ครั้งที่	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)					
		ระยะทาง ที่เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	ค่าทางสถิติ			ระยะทาง ที่เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	ค่าทางสถิติ				
			จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม		มัช ฐาน ( $\bar{x}$ )	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม	มัช ฐาน ( $\bar{x}$ )
5	1	7.9	10	8.0	7.9	7.9	7.5	10	7.7	7.5	7.6
	2	7.9					7.5				
	3	8.0					7.5				
	4	8.2					7.3				
	5	7.9					8.1				
	6	7.9					8.0				
	7	8.4					7.9				
	8	8.5					7.4				
	9	7.8					7.6				
	10	7.9					7.7				
10	1	11.0	10	11.2	11.0	11.0	11.0	10	11.1	11.0	11.0
	2	10.5					11.0				
	3	11.5					11.0				
	4	12.0					10.5				
	5	11.0					11.5				
	6	11.0					11.5				
	7	11.5					10.9				
	8	11.5					11.0				
	9	10.5					11.0				
	10	11.0					11.2				

ตารางที่ ๑๒ (ต่อ)

เวลา (นาที)	ครั้งที่	หลอดตรวจวัดขนาด 1.0 (mm.i.d.)				หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)					
		ระยะทาง ที่เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	ค่าทางสถิติ			ระยะทาง ที่เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	ค่าทางสถิติ				
			จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม		มัธย ฐาน ( $\bar{x}$ )	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่า เฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม	มัธย ฐาน ( $\bar{x}$ )
15	1	11.0	10	11.3	11.0	11.1	11.1	10	11.1	11.0	11.0
	2	10.9					11.0				
	3	11.5					11.0				
	4	12.0					10.9				
	5	11.0					11.5				
	6	11.1					11.6				
	7	11.5					11.0				
	8	11.6					11.0				
	9	10.9					11.0				
	10	11.0					11.2				
20	1	11.0	10	11.3	11.0	11.2	11.1	10	11.2	11.0	11.1
	2	11.2					11.0				
	3	11.5					11.0				
	4	12.0					11.2				
	5	11.0					11.5				
	6	11.2					11.6				
	7	11.5					11.0				
	8	11.6					11.0				
	9	11.0					11.0				
	10	11.0					11.2				

ตารางที่ ๑๓ การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา - ออโรโทลิซีน 0.05 % (w/w) ในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระ 50 ppm ทดสอบโดยการฉีด

เวลา (นาที)	ครั้งที่	หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				
		ระยะทางที่เกิด การเปลี่ยนสี (mm)	ค่าทางสถิติ			
			จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\tilde{x}$ )
1	1	22.5	10	22.3	22.5	22.3
	2	22.0				
	3	22.5				
	4	22.5				
	5	22.0				
	6	22.5				
	7	22.0				
	8	22.0				
	9	22.5				
	10	22.0				
2	1	22.5	10	22.4	22.5	22.5
	2	22.5				
	3	22.5				
	4	22.0				
	5	22.5				
	6	22.5				
	7	22.5				
	8	22.0				
	9	22.0				
	10	22.5				
3	1	22.5	10	22.4	27.5	22.5
	2	22.5				
	3	22.5				
	4	22.0				
	5	22.5				
	6	22.5				
	7	22.5				
	8	22.0				
	9	22.5				
	10	22.5				

ตารางที่ ๓3 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	ครั้งที่	หลอดตรวจวัดขนาด 2.6 (mm.i.d.)				
		ระยะทางที่เกิด การเปลี่ยนสี (mm)	ค่าทางสถิติ			
			จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐานนิยม	มัธยฐาน ( $\tilde{x}$ )
4	1	22.5	10	22.5	22.5	22.5
	2	22.5				
	3	22.5				
	4	22.5				
	5	22.5				
	6	22.5				
	7	22.0				
	8	22.5				
	9	22.5				
	10	22.5				
5	1	22.5	10	22.5	22.5	22.5
	2	22.5				
	3	22.5				
	4	22.0				
	5	22.5				
	6	22.5				
	7	22.5				
	8	22.5				
	9	22.5				
	10	22.5				

ตารางที่ ๑๔ การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 50 ppm ของ  
 หลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา - ออโซโทลิติน 0.05 % (w/w)

ร้อยละ การ เคลือบ  (% : w/w)	ครั้ง ที่	ปรับ pH (1.79)				ไม่ปรับ pH (10.05)					
		ระยะทาง ที่เกิดการ เปลี่ยนสี  (mm)	ค่าทางสถิติ			ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี  (mm)	ค่าทางสถิติ				
			จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด  (n)	ค่าเฉลี่ย  ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม  ( $\tilde{x}$ )		จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด  (n)	ค่าเฉลี่ย  ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม  ( $\tilde{x}$ )		
0.05A	1	16.0	20	16.1	16.0	16.0	22.5	20	22.2	22.0	22.0
	2	16.0					22.5				
	3	16.5					22.0				
	4	17.0					22.5				
	5	16.0					22.0				
	6	16.0					22.0				
	7	17.0					22.0				
	8	16.5					22.5				
	9	16.0					22.0				
	10	16.0					22.5				
0.05 B	1	16.0	20	16.1	16.0	16.0	22.0	20	22.2	22.0	22.0
	2	16.0					22.5				
	3	16.0					22.5				
	4	16.5					22.0				
	5	16.0					22.0				
	6	15.5					22.0				
	7	15.0					22.0				
	8	16.0					22.0				
	9	16.0					22.5				
	10	16.0					22.5				

ตารางที่ ๓5 ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของหลอดตรวจวัดที่บรรจุซิลิกา – ออโรโทลูอีน 0.05% (w/w) เมื่อตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 0-100 ppm

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										วิธีการตรวจวัด									
	หลอดตรวจวัด					หลอดตรวจวัด					หลอดตรวจวัด					หลอดตรวจวัด				
	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัธยฐาน
0.00	0.05 A	1	0.0	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	0.0																	
		3	0.0																	
		4	0.0																	
		5	0.0																	
		6	0.0																	
		7	0.0																	
		8	0.0																	
		9	0.0																	
		10	0.0																	
0.00	0.05 B	1	0.0	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		2	0.0																	
		3	0.0																	
		4	0.0																	
		5	0.0																	
		6	0.0																	
		7	0.0																	
		8	0.0																	
		9	0.0																	
		10	0.0																	
3.00	0.05 A	1	1.0	20	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		2	1.0																	
		3	1.0																	
		4	1.0																	
		5	1.0																	
		6	1.0																	
		7	1.0																	
		8	1.0																	
		9	1.0																	
		10	1.0																	
3.00	0.05 B	1	1.0	20	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		2	1.0																	
		3	1.0																	
		4	1.0																	
		5	1.0																	
		6	1.0																	
		7	1.0																	
		8	1.0																	
		9	1.0																	
		10	1.0																	

ตารางที่ ๓5 (ต่อ)

ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										วิธีการตรวจวัด										ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)
	วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด						
	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้ง ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าทางสถิติ ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม ( $\tilde{x}$ )	ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้ง ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าทางสถิติ ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ฐาน นิยม ( $\tilde{x}$ )	ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)								
0.05 A	5.00	1	1.5	20	1.5	1.5	5.00	0.05 A	1	2.1	20	2.1	2.1	7.00								
		2	2.1																			
		3	2.1																			
		4	2.1																			
		5	2.0																			
		6	2.1																			
		7	2.0																			
		8	2.0																			
		9	2.1																			
		10	2.0																			
0.05 B	5.00	1	1.5	20	1.5	1.5	5.00	0.05 B	1	2.1	20	2.1	2.1	7.02								
		2	2.0																			
		3	2.0																			
		4	2.1																			
		5	2.0																			
		6	2.0																			
		7	2.0																			
		8	2.0																			
		9	2.1																			
		10	2.1																			

ตารางที่ ๓5 (ต่อ)

ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด				ยูวี-ลิตมิค สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)
	วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด						วิธีการตรวจวัด				
	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้งที่ ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	มัช ฐาน ( $\tilde{x}$ )	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)		ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	มัช ฐาน ( $\tilde{x}$ )	ยูวี-ลิตมิค สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)		
0.05 A	การ เคลือบ	1	5.5	20	5.6	5.5	0.05 A	1	6.5	20	6.4	6.5	13.00	10.08		
		2	6.0					2	6.5							
		3	5.5					3	6.5							
		4	5.5					4	6.5							
		5	5.5					5	6.5							
		6	6.0					6	6.5							
		7	6.0					7	6.5							
		8	5.0					8	6.0							
		9	6.0					9	6.5							
		10	6.0					10	6.5							
0.05 B	การ เคลือบ	1	6.0	20	5.6	5.5	0.05 B	1	6.5	20	6.4	6.5	13.00	10.08		
		2	5.5					2	6.0							
		3	5.0					3	6.5							
		4	5.5					4	6.5							
		5	5.0					5	6.5							
		6	5.0					6	6.5							
		7	6.0					7	6.5							
		8	5.0					8	6.0							
		9	6.0					9	6.0							
		10	5.0					10	6.0							

ตารางที่ ๑5 (ต่อ)

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										วิธีการตรวจวัด					ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)					
	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	หาค่าทางสถิติ			จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย	ฐานนิยม	มัธยฐาน	ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	ร้อยละการเคลือบ (% : w/w)	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)		หาค่าทางสถิติ				
				จำนวนครั้งของการตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย	ฐานนิยม											มัธยฐาน	จำนวนครั้งของการตรวจวัด	ค่าเฉลี่ย	ฐานนิยม	มัธยฐาน
0.05 A	1	8.0	20	8.1	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	15.04	17.00	0.05 A	1	5.0	20	5.0	5.0	5.0			
		2											5.0								
		3											5.0								
		4											5.0								
		5											5.0								
		6											5.0								
		7											5.0								
		8											5.0								
		9											5.0								
		10											5.0								
0.05 B	1	8.0	20	8.1	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	15.04	17.00	0.05 B	1	5.0	20	5.0	5.0	5.0			
		2											5.0								
		3											5.0								
		4											5.0								
		5											5.0								
		6											5.0								
		7											5.0								
		8											5.0								
		9											5.0								
		10											5.0								

ตารางที่ ๓.5 (ต่อ)

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										วิธีการตรวจวัด										ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	ผู้-วิสิบลิต สปภโพร โฟโตเมทรี (ppm)
	หลดตตรวจวัด										หลดตตรวจวัด											
	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที	ระยะทางทีเกิดการเปลียนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัชฐาน (x̃)	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที	ระยะทางทีเกิดการเปลียนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม	มัชฐาน (x̃)	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที	ระยะทางทีเกิดการเปลียนสี (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย (x̄)	ฐานนิยม		
20.00	0.05 A	1	5.5	20	5.5	5.5	5.5	0.05 A	1	6.0	20	6.0	6.0	6.0	0.05 B	1	6.0	20	6.0	6.0	6.0	
		2	5.0						2	6.5												
		3	5.5						3	6.0												
		4	5.5						4	6.0												
		5	5.5						5	6.0												
		6	5.5						6	6.0												
		7	5.5						7	5.5												
		8	6.0						8	6.0												
		9	5.5						9	6.0												
		10	5.5						10	6.0												
23.00	0.05 B	1	5.5	20	5.5	5.5	5.5	0.05 B	1	6.0	20	6.0	6.0	6.0	0.05 B	1	6.0	20	6.0	6.0	6.0	
		2	5.5						2	6.0												
		3	5.5						3	6.0												
		4	5.5						4	6.0												
		5	5.0						5	5.5												
		6	5.5						6	6.0												
		7	5.5						7	6.0												
		8	5.5						8	6.0												
		9	5.5						9	6.0												
		10	5.5						10	6.0												

ตารางที่ ๓5 (ต่อ)

ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	ยูวี-วิทีเบิล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)
	วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด						
	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้ง ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย ฐาน นิยม $(\bar{x})$	มัช ฐาน $(\tilde{x})$	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้ง ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)		
0.05 A	0.05 A	1	7.0	20	7.0 $(\bar{x})$	7.0 $(\tilde{x})$	0.05 A	1	7.5	20	7.5 $(\bar{x})$	7.5 $(\tilde{x})$
		2	7.0									
		3	7.0									
		4	7.0									
		5	7.5									
		6	7.0									
		7	7.0									
		8	7.0									
		9	7.0									
		10	7.0									
0.05 B	0.05 B	1	7.0	20	7.0 $(\bar{x})$	7.0 $(\tilde{x})$	0.05 B	1	7.5	20	7.5 $(\bar{x})$	7.5 $(\tilde{x})$
		2	7.0									
		3	6.5									
		4	7.0									
		5	7.0									
		6	7.0									
		7	7.0									
		8	7.5									
		9	7.0									
		10	7.0									

ตารางที่ ๓5 (ต่อ)

ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										ยูวี-ลิตนัล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)
	วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด						วิธีการตรวจวัด					วิธีการตรวจวัด					
	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้งที่ ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)			จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าทางสถิติ			ร้อยละ การ เคลือบ		ครั้งที่ ที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)			จำนวนครั้ง ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าทางสถิติ			ยูวี-ลิตนัล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)		
			ค่าเฉลี่ย	ฐาน นิยม	มัธ ฐาน		ค่าเฉลี่ย	ฐาน นิยม	มัธ ฐาน				ค่าเฉลี่ย	ฐาน นิยม	มัธ ฐาน							
0.05 A	0.05 A	1	8.0			20	8.0	8.0	8.0	1	8.5	8.5	8.5	20	8.4	8.5	8.5	32.90				
		2	8.0																2	8.5	8.5	8.5
		3	8.0																3	8.5	8.5	8.5
		4	8.0																4	8.5	8.5	8.5
		5	7.5																5	8.5	8.5	8.5
		6	8.0																6	8.5	8.5	8.5
		7	8.0																7	8.5	8.5	8.5
		8	8.5																8	8.5	8.5	8.5
		9	8.0																9	7.5	7.5	7.5
		10	8.0																10	7.5	7.5	7.5
30.00	0.05 B	1	8.0			20	8.0	8.0	8.0	1	8.5	8.5	8.5	20	8.4	8.5	8.5	32.90				
		2	8.0																2	8.5	8.5	8.5
		3	8.0																3	8.5	8.5	8.5
		4	8.0																4	8.5	8.5	8.5
		5	8.5																5	9.0	9.0	9.0
		6	8.0																6	7.5	7.5	7.5
		7	8.0																7	8.5	8.5	8.5
		8	8.0																8	8.5	8.5	8.5
		9	8.0																9	9.0	9.0	9.0
		10	8.0																10	9.0	9.0	9.0

ตารางที่ ๑5 (ต่อ)

ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด						ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	ยูวี-วิทีบิลิตี สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)
	หลดตรวจวัด							
	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้งที่ เกิด การ เปลี่ยนสี	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	จำนวนครั้งที่ ของการ ตรวจวัด (n)	ค่าทางสถิติ ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	มัช ฐาน ( $\tilde{x}$ )		
35.00	0.05 A	1	9.0	20	9.0	9.0	35.19	
		2	9.0					
		3	9.0					
		4	9.0					
		5	9.0					
		6	9.0					
		7	9.0					
		8	9.0					
		9	9.0					
		10	9.0					
36.88	0.05 B	1	9.5	20	9.5	9.5	36.88	
		2	9.5					
		3	9.5					
		4	9.5					
		5	9.5					
		6	9.5					
		7	9.5					
		8	9.5					
		9	9.5					
		10	9.5					



ตารางที่ ๑5 (ต่อ)

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด										ผู้-วิไลbild สป.โทร โฟโตเมทรี (ppm)			
	หอดตรวจวัด											หอดตรวจวัด											ผู้-วิไลbild สป.โทร โฟโตเมทรี (ppm)		
	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย	ฐานนิยม	มัธยฐาน	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)		จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย	ฐานนิยม	มัธยฐาน	ร้อยละการเคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (mm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย	ฐานนิยม			มัธยฐาน	
45.00	0.05 A	1	11.0	20	11.0	11.0	11.0	45.21	47.00	0.05 A	1	11.5	20	11.5	11.5	11.5	47.31	47.00	0.05 A	1	11.5	20	11.5	11.5	11.5
		2	11.0								2	11.5													
		3	11.0								3	11.5													
		4	11.0								4	11.5													
		5	11.0								5	11.5													
		6	11.0								6	11.5													
		7	11.0								7	11.5													
		8	11.0								8	11.5													
		9	11.0								9	11.5													
		10	11.0								10	11.5													
45.00	0.05 B	1	11.0	20	11.0	11.0	45.21	47.00	0.05 B	1	11.5	20	11.5	11.5	11.5	47.31	47.00	0.05 B	1	11.5	20	11.5	11.5	11.5	
		2	11.0							2	11.5														
		3	11.0							3	11.5														
		4	11.0							4	11.5														
		5	11.0							5	11.5														
		6	11.5							6	11.5														
		7	11.0							7	11.5														
		8	11.0							8	11.5														
		9	11.0							9	11.5														
		10	11.0							10	11.5														



ตารางที่ ๑๕ (ต่อ)

ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด					ความ เข้มข้น ของ คลอรีน อิสระ (ppm)	วิธีการตรวจวัด					ยูวี-วิสิบิล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)			
	ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	หาค่าตรวจวัด			ร้อยละ การ เคลือบ	ครั้งที่	ระยะทางที่ เกิดการ เปลี่ยนสี (mm)	หาค่าตรวจวัด			ยูวี-วิสิบิล สเปกโทร โฟโตเมทรี (ppm)		
				จำนวนครั้งที่ ตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย					ฐาน นิยม	มัช ฐาน ( $\bar{x}$ )			จำนวนครั้งที่ ตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย
70.00	0.05 A	1	26.0	20	26.9	26.5	26.5	80.00	1	29.0	20	28.7	29.0	79.82	
		2	27.5						2	28.5					
		3	26.5						3	29.0					
		4	27.5						4	29.0					
		5	26.5						5	29.0					
		6	26.5						6	29.0					
		7	27.5						7	28.5					
		8	26.5						8	28.5					
		9	26.5						9	28.0					
		10	26.5						10	29.0					
70.00	0.05 B	1	27.5	20	26.9	26.5	26.5	80.00	1	29.0	20	28.7	29.0	79.82	
		2	26.5						2	28.5					
		3	27.5						3	28.5					
		4	26.5						4	28.5					
		5	26.0						5	29.0					
		6	26.0						6	28.0					
		7	27.5						7	29.0					
		8	26.5						8	29.0					
		9	26.0						9	28.5					
		10	30.0						10	29.0					









ตารางที่ ๓6 (ต่อ)

ผลการตรวจวัด		หอดูดตรวจวัด										บุรี-วิถีเขตชลประทานโพธิ์แดง						
		ค่าทางสถิติ						ค่าทางสถิติ				ค่าทางสถิติ		ค่าทางสถิติ				
ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น (ppm)	ครั้งที่	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ความแปรปรวน ( $S^2$ )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ( $S\bar{x}$ )	จำนวนนิม	มัธยฐาน ( $\tilde{x}$ )	ความแปรปรวน ( $S^2$ )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	จำนวนนิม	มัธยฐาน ( $\tilde{x}$ )	ความแปรปรวน ( $S^2$ )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย ( $S\bar{x}$ )
20.00	1	20	10	19.80	20.00	0.42	0.09	20.00	20.00	0.18	0.42	10	20.03	20.16	20.14	0.06	0.25	0.06
	2	20										20.00						
	3	19										20.13						
	4	20										19.51						
	5	20										19.64						
	6	20										20.27						
	7	20										20.16						
	8	19										20.14						
	9	20										20.16						
	10	20										20.14						
25.00	1	25	10	24.70	25.00	0.48	0.11	25.00	25.00	0.23	0.48	10	24.95	24.91	0.08	0.28	0.06	
	2	24										25.29						
	3	24										25.00						
	4	25										24.60						
	5	25										25.30						
	6	25										24.80						
	7	24										25.09						
	8	25										24.64						
	9	25										24.81						
	10	25										24.67						









ตารางที่ ๑๘ การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างจากสระว่าน้ำสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติม (ppm)	วิธีการตรวจวัด															
	ครั้งที่	หลอดตรวจวัด					คู่มือผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์									
		ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ความแปรปรวน (s <sup>2</sup> )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (S <sub>x̄</sub> )	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ความแปรปรวน (s <sup>2</sup> )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (S <sub>x̄</sub> )					
ขอบสระด้านทิศเหนือ	1	3	25.00	3.04	3.00	3.00	3.00	0.12	0.35	0.08	3.25	25.00	3.13	0.07	0.26	0.06
	2	3									2.99					
	3	3									3.13					
	4	3									3.19					
	5	2									2.90					
ขอบสระด้านทิศใต้	1	3									2.84					
	2	3									3.24					
	3	3									3.34					
	4	3									3.40					
	5	3									3.09					
ขอบสระด้านทิศตะวันออก	1	3									3.38					
	2	3	25.00	3.04	3.00	3.00	3.00	0.12	0.35	0.08	3.50	25.00	3.13	0.07	0.26	0.06
	3	3									3.38					
	4	3									2.80					
	5	3									3.40					
ขอบสระด้านทิศตะวันตก	1	3									2.75					
	2	3									3.13					
	3	3									2.69					
	4	4									2.72					
	5	3									3.15					
กลางสระ	1	3									3.21					
	2	4									3.41					
	3	3									3.13					
	4	3									2.75					
	5	3									3.43					

ตารางที่ ๘9 การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างจากสระว่ายน้ำสวนพระนคร

ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เดิม (ppm)	วิธีการตรวจวัด									
	หลอดตรวจวัด					ยูวี-วิทีเดิมแบบโทรโฟโตเมทรี				
	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ความแปรปรวน (S <sup>2</sup> )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (S $\bar{x}$ )	ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)	จำนวนครั้งของการตรวจวัด (n)	ค่าเฉลี่ย ( $\bar{x}$ )	ความแปรปรวน (S <sup>2</sup> )	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (S $\bar{x}$ )
ขอบสระ	1	0				0.00				
ด้านทิศเหนือ	2	0				0.00				
	3	0				0.00				
	4	0				0.00				
	5	0				0.00				
ขอบสระด้านทิศใต้	1	0				0.00				
	2	0				0.00				
	3	0				0.00				
	4	0				0.01				
	5	0				0.00				
ขอบสระด้านทิศตะวันออก	1	0				0.00				
	2	0				0.00				
	3	0	25.00	0.00	0.00	0.02	25.00	0.00	0.00	0.00
	4	0				0.00				
	5	0				0.00				
ขอบสระด้านทิศตะวันตก	1	0				0.00				
	2	0				0.01				
	3	0				0.00				
	4	0				0.02				
	5	0				0.02				
กลางสระ	1	0				0.02				
	2	0				0.00				
	3	0				0.00				
	4	0				0.00				
	5	0				0.02				



ภาคผนวก ช.

วิธีคำนวณผลการทดลองทางสถิติ

## 1. การคำนวณค่าช่วงความเชื่อมั่น (confident interval :CI)

### วิธีการคำนวณ

เนื่องจาก  $n < 30$  จะใช้การแจกแจงของ  $t$  ในการหาพื้นที่ส่วนปลายใต้เส้นโค้งปกติเพื่อกำหนดระดับนัยสำคัญ โดยใช้  $\bar{x}$  ในการประมาณค่า CI

ที่ระดับความเชื่อมั่น  $(1 - \alpha)100\%$  หรือระดับความเชื่อมั่น 95% จะได้

$$CI = \bar{x} \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

เช่น การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 5 ppm ในหัวข้อที่ 4.1.4.1

$$\bar{x} = 4.8$$

$$s = 0.42$$

$$n = 10$$

จากตาราง  $t$  เมื่อพื้นที่ส่วนปลายใต้เส้นโค้งปกติแต่ละข้าง = 0.025,  $V = 9$  จะได้ค่า  $t = 2.262$

$$CI = 4.8 \pm \left( 2.262 \cdot \frac{0.42}{\sqrt{10}} \right)$$

$$CI = 4.8 \pm 0.3$$

ดังนั้นหลอดตรวจวัดสามารถตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้น 5 ppm ได้เท่ากับ

$4.8 \pm 0.3$  ppm ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

## 2. การทดสอบสมมติฐานด้วย $t$ - test (paired $t$ - test)

### วิธีการคำนวณ

เนื่องจากการทดลองจะใช้หลอดตรวจวัดสำหรับตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระและเปรียบเทียบวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี ซึ่งข้อมูลของ 2 กลุ่มตัวอย่างมีความสัมพันธ์กันคือ ผลการตรวจวัดตัวอย่างเดียวกันจาก 2 วิธี ที่ระดับความเข้มข้นหลายระดับที่ไม่กว้างนัก จึงใช้ paired  $t$  - test ในการทดสอบ

เช่น การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 5 ppm ในหัวข้อที่ 4.1.4.1

### สมมติฐาน

$$H_0 : \mu_D = 0 \quad \text{เมื่อ } \mu_D = \mu_1 - \mu_2$$

$$H_1 : \mu_D \neq 0$$

ค่าวิกฤตของ  $t$  ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ  $V = 10 - 1 = 9$  สำหรับสมมติฐานสองทาง คือ

$$t_{\text{crit.}} = \pm t_{0.025} = \pm 2.262$$

### การตัดสินใจ

จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $t$  ที่ได้จากการคำนวณ ( $t_{cal}$ ) มีค่ามากกว่า +2.262 หรือน้อยกว่า -2.262  
วิธีการคำนวณค่า  $t$

วิธีการตรวจวัด		D	D - $\bar{D}$	$(D - \bar{D})^2$
หลอดตรวจวัด (ppm)	ยูวี-วิติเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี (ppm)			
5	4.78	0.22	0.41	0.17
5	5.00	0.00	0.19	0.04
4	5.00	-1.00	-0.81	0.66
5	4.77	0.23	0.42	0.18
5	4.71	0.29	0.48	0.23
4	4.98	-0.98	-0.79	0.62
5	5.36	-0.36	-0.17	0.03
5	5.33	-0.33	-0.14	0.02
5	4.76	0.24	0.43	0.18
5	5.24	-0.24	-0.05	0.00
		$\sum D = -1.93$		$(\sum (D - \bar{D})^2 = 2.13$

$$\begin{aligned}\bar{D} &= \frac{\sum D}{n} \\ &= \frac{-1.93}{10} \\ &= -0.193\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}s &= \sqrt{\frac{(D - \bar{D})^2}{n-1}} \\ &= \sqrt{\frac{2.13}{10-1}} \\ &= 0.486\end{aligned}$$

เมื่อ D = ความแตกต่างระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระที่ตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิติเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

$\bar{D}$  = ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระที่ตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิติเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

s = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างระหว่างปริมาณคลอรีนอิสระที่ตรวจวัดด้วย  
 หลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

$$t = \frac{\bar{D}}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

$$t = \frac{-0.193}{\frac{0.486}{\sqrt{10}}}$$

$$= -1.255$$

สรุป  $t_{\text{cal}} (-1.255)$  มีค่าอยู่ในช่วงของ  $t_{\text{crit.}}$  ( $> -2.262$  และ  $< +2.262$ )

ดังนั้นวิธีตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

### 3. การทดสอบสมมติฐานด้วย F – test

#### วิธีการคำนวณ

ทดสอบความเที่ยงของวิธีตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี

เช่น การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 5 ppm ในหัวข้อที่ 4.1.4.1

#### สมมติฐาน

$$H_0 : S_1^2 = S_2^2$$

$$H_1 : S_1^2 > S_2^2$$

เมื่อ  $S_1^2 =$  ความแปรปรวนของการตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัด  
 $= 0.178$

$S_2^2 =$  ความแปรปรวนของการตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรี  
 $= 0.060$

ค่าวิกฤตของ F ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ  $V_1 = 10 - 1 = 9$ ,  $V_2 = 10 - 1 = 9$  สำหรับ  
 สมมติฐานทางเดียวทางขวามือ คือ

$$F_{\text{crit.}} \text{ ทางขวามือ} = F_{0.05(9,9)} = 3.18$$

การตัดสินใจ

จะปฏิเสธ  $H_0$  เมื่อ  $F$  ที่ได้จากการคำนวณ ( $F_{cal}$ ) มีค่ามากกว่า 3.18

วิธีการคำนวณค่า  $F$ 

$$\begin{aligned} F &= \frac{s_1^2}{s_2^2} \\ &= \frac{0.178}{0.060} \\ &= 2.97 \end{aligned}$$

สรุป  $F_{cal} (2.97)$  มีค่าน้อยกว่า  $F_{crit.} (3.18)$

ดังนั้นความเที่ยงของวิธีการตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดกับวิธีมาตรฐานยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมทรีมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

#### 4. การคำนวณค่า %RSD<sub>r</sub> โดยประเมินด้วย Horwitz's equation และ HORRAT

วิธีการคำนวณ

เช่น การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระความเข้มข้น 5 ppm ในหัวข้อที่ 4.1.4.1

ตรวจวัดคลอรีนอิสระที่เตรียมขึ้นด้วยหลอดตรวจวัดจะทำการตรวจวัด 10 ซ้ำในแต่ละความเข้มข้นในเวลาใกล้เคียงกัน คำนวณดังนี้

- การคำนวณ %RSD<sub>r</sub>

$$\% RSD_r = \left( \frac{s}{\bar{x}} \right) \times 100$$

เมื่อ  $s = 0.42$

$$\bar{x} = 4.80$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \% RSD_r &= \left( \frac{0.42}{4.80} \right) \times 100 \\ &= 8.8 \% \end{aligned}$$

- การคำนวณค่า expected %RSD<sub>r</sub> จาก Horwitz's equation

$$\text{expected \%RSD}_r = 0.66 \times 2 \times C^{-0.1505}$$

เมื่อ  $C = \bar{x} \times 10^{-6} = 4.80 \times 10^{-6}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{expected \%RSD}_r &= 0.66 \times 2 \times (4.80 \times 10^{-6})^{-0.1505} \\ &= 7.6 \% \end{aligned}$$

- การคำนวณค่าHORRAT

$$\begin{aligned} \text{HORRAT} &= \frac{\% \text{ RSD}_r}{\% \text{ RSD}_{\text{expected}}} \\ &= \frac{8.8}{7.6} \\ &= 1.2 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า HORRAT น้อยกว่า 2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ( $\text{HORRAT}_{\text{AOAC}} < 2$ ) สรุปว่าความเที่ยงของวิธีการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระด้วยหลอดตรวจวัดยอมรับได้

#### 5. การคำนวณร้อยละการคืนกลับ (% recovery)

เช่น การตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระที่เติมในน้ำตัวอย่างความเข้มข้น 5 ppm ในหัวข้อที่

4.1.4.2

$$\% \text{ Recovery} = \left( \frac{C_1 - C_2}{C_3} \right) \times 100$$

$C_1$  = ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระหลังจากที่เติมคลอรีนอิสระ = 7.9 ppm

$C_2$  = ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำตัวอย่างที่ไม่เติมคลอรีนอิสระ = 2.959 ppm

$C_3$  = ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระที่เติมในน้ำ = 5.00 ppm

$$\begin{aligned} \% \text{ Recovery} &= \left( \frac{7.9 - 2.950}{5.00} \right) \times 100 \\ &= 98.8 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นความแม่นยำของวิธีการตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระด้วยหลอดตรวจวัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ (% recovery<sub>AOAC</sub> = 80 ถึง 110 %)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นางสาวอรุณฉาย อุนาศรี
วัน/เดือน/ปีเกิด	8 กุมภาพันธ์ 2521
สถานที่เกิด	อำเภอหนองพอก จังหวัดร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	
ปริญญาตรี	วทบ.(เคมี) สาขาวิชาเคมีวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลคลองหก พ.ศ. 2544
มัธยมศึกษา	โรงเรียนร้อยเอ็ดวิทยาลัย พ.ศ. 2540
ความชำนาญเฉพาะด้าน	ชำนาญในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ด้านเคมี ได้แก่ GC-MS, FT-IR, UV-Visible spectrophotometer, AAS, Particle size analyzer , TGA และ HPLC
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2543	ฝึกงานที่บริษัทชวลวaley จังหวัดสระบุรี
พ.ศ.2544-2546	ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ ศูนย์บริการและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2547-2550	อาจารย์ผู้ช่วยสอน (TA) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการวิจัยที่ได้รับ	ทุนวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง