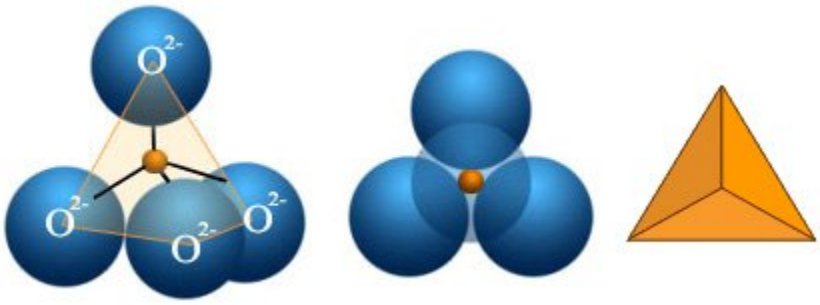
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารพอลิเมอร์อนินทรีย์ที่เกิดจากการรวมกันของซิลิคอนและออกซิเจน ซึ่งจะมีสูตรทางเคมีเป็น SiO_2 โดยจะมีซิลิคอนเป็นอะตอมกลาง และออกซิเจนล้อมรอบ ซึ่งจะมีการจัดเรียงตัวแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.5 ซิลิกามีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ สีขาวไม่มีกลิ่น น้ำหนักโมเลกุล 60.08 จุดเดือดมากกว่า 2200 ^{o}C จุดหลอมเหลว 1713 ^{o}C ความถ่วงจำเพาะ 2.2 ไม่ละลายน้ำ ไม่ไวไฟ มีความคงตัวทางเคมี และมีความเสถียรเมื่อสลายตัวจะเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเกิดการระเบิดได้ถ้าผสมกับอากาศ ถ้าหายใจเอาฝุ่นเข้าไปเป็นเวลานาน จะทำให้เป็นโรคถุงลมปอด เมื่อถูกผิวหนัง สัมผัสถูกตา กลืนหรือกินเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคือง [11]



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวกันแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกา [12.]

2.1.1 ชนิดของซิลิกา

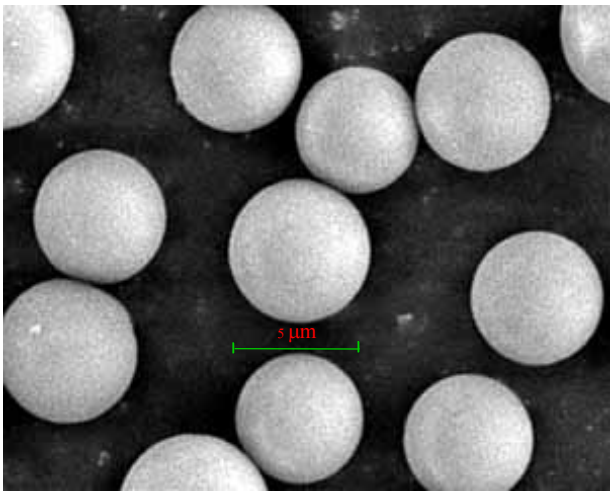
ซิลิกาแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

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

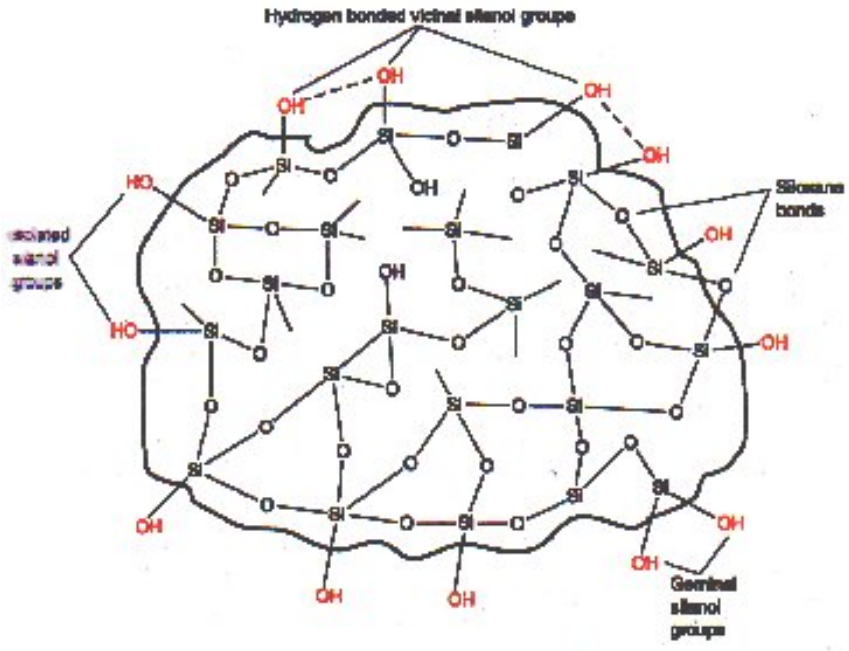
2.2.1.2 Microcrystalline Silica เป็นซิลิกาที่เกิดตามธรรมชาติ

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

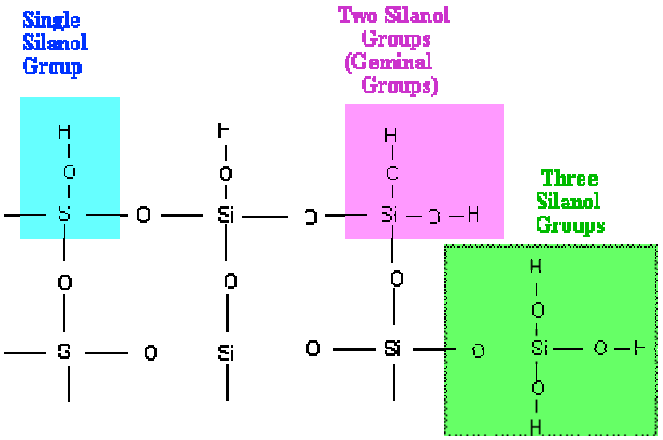
ซิลิกาอสัญฐานจะมีอนุภาคขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร (μm) และมีพื้นที่ผิวสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการทำเฟสที่อยู่กับที่ (Stationary phase) ในทางโครมาโทกราฟี ภายในโครงสร้างจะมีรูพรุนขนาดเล็ก และต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยที่ผิวจะมีหมู่ไฮดรอกซีไซลานอล (Hydroxy Silanol Group : -Si-OH) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4



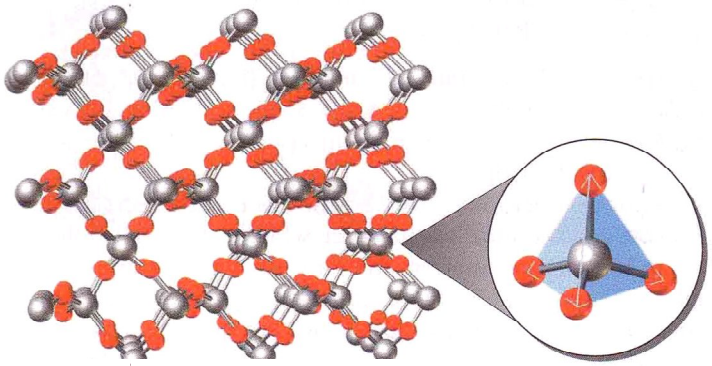
รูปที่ 2.2 ลักษณะของอนุภาคซิลิกาที่ใช้ทำเฟสที่อยู่กับที่ของ HPLC [13]



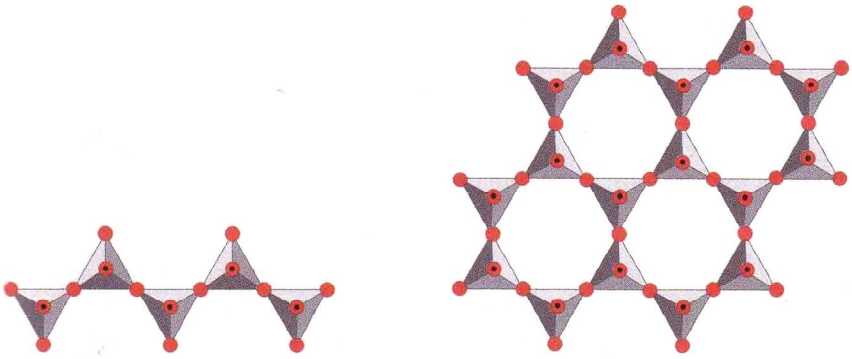
รูปที่ 2.3 โครงสร้างและการเกิดพันธะภายในโครงร่างตาข่ายของซิลิกา โดยที่ผิวจะมีหมู่ไฮดรอกซีไซลานอล [14]



รูปที่ 2.4 หมู่ไฮดรอกซีไซลานอลบนผิวของซิลิกาแบบต่างๆ [15]



แก้วควอตซ์จัดเรียงกันแบบเตตระฮีดอล



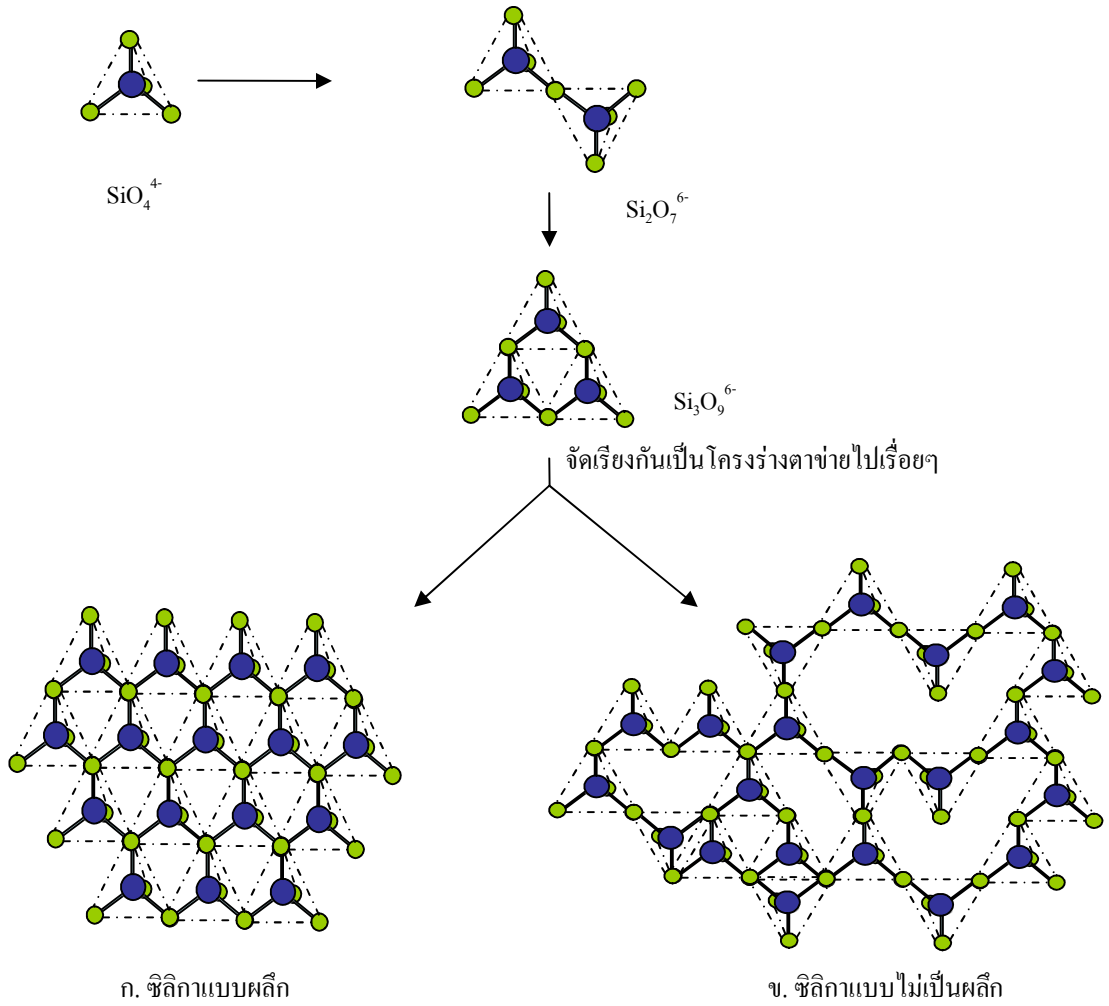
$(SiO_3^{2-})_n$ $(Si_4O_{10}^{4-})_n$

รูปที่ 2.5 ซิลิกาในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจัดเรียงกันแบบเตตระฮีดอล [16]

2.1.2 การเกิดพอลิเมอไรซชัน (Polymerization) ของซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารที่ทนต่อสารเคมี โดยปกติแล้วซิลิกาจะเป็นสารที่ทนต่อกรดเกือบทุกชนิดยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้ซิลิกาสามารถเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้หลายแบบ

การเกิดพอลิเมอไรเซชันของซิลิกาจะทำให้เกิดการจัดเรียงกันเป็นโครงร่างตาข่าย โดยที่ขั้นตอนของการเกิดจะเริ่มจากโมโนเมอร์ (monomer) รวมกันเป็นอนุภาค แล้วก็ขยายอนุภาคหลังจากนั้นจึงเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างตาข่ายไปเรื่อยๆ จนได้โมเลกุลโครงร่างตาข่ายขนาดใหญ่หรือที่เรียกว่าโครงร่างตาข่ายแบบไม่รู้จบดังแสดงในรูปที่ 2.6



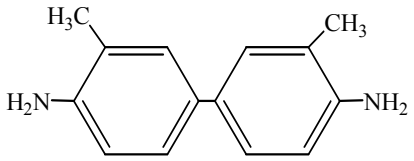
รูปที่ 2.6 การเกิดเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบร่างตาข่ายของซิลิกาแบบผลึก (ก) และแบบไม่เป็นผลึก (ข) [17]

ประโยชน์ของซิลิกาในด้านเคมีมีหลายอย่าง เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับไอออนของโลหะ ทำเป็นคอลัมน์ (Column) ในทางโครมาโทกราฟี ซึ่งจะใช้ซิลิกาแบบอสัณฐานดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นต้น และเนื่องจากที่พื้นที่ผิวของซิลิกาจะมีหมู่ไฮดรอกซีไซลานอลอยู่จึงนิยมนำเอาสารบางชนิดมาเคลือบบนซิลิกาเพื่อประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

2.2 ออโธโทลิดีน [18]

ออโธโทลิดีนเป็นชื่อทางเคมีทั่วไป และนอกจากนี้ยังมีชื่อพ้องอื่นๆ ได้แก่ 3,3' -ไดเมทิลเบนซิดีน (3,3'-Dimethylbenzidine), ดีเอ็มบี (DMB), ฟาสดรากบลูเบสอาร์ (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-ออโธ-โทลิดีน (3,3'-tolidine 4,4'-bi-o-tolidine), 4,4'-ไดอะมิโน-3,3'-ไดเมทิลไบฟีนิล (4,4'-diamino-3,3'-dimethylbiphenyl), ไดอะมิโนไดโทลิล (Diaminoditolyl), ไบอะนิซิดีน (Bianisidine), ออโธออโธไพน์-โทลิดีน (o,o'-tolidine), ซีไอ 37230 (C.I. 37230), ซีไออะโซอิกไดอะโซคอมโพเนนท์ 113 (C.I. azoic diazo component 113), 3,3'-ไดเมทิลเบนซิดีน (ออโธโทลิดีน) [3,3'-Dimethylbenzidine (o-Tolidine)] หรือ ไดเมทิลเบนซิดีน 3,3'- (Dimethylbenzidine, 3,3')

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



รูปที่ 2.7 สูตรโครงสร้างของออโธโทลิดีน [19]

ได้มีการนำออโธโทลิดีนมาใช้ประโยชน์สำหรับบำบัดน้ำเสีย และนอกจากนี้ก็ได้มีการนำออโธโทลิดีนมาใช้ประโยชน์ทางด้านเคมีวิเคราะห์ คือ ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของคลอรีนอิสระตกค้าง ออโธโทลิดีนมีสถานะเป็นผงหรือผลึกสีขาวแดง เป็นสารที่ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 212.28 จุดเดือด 300 ^{o}C จุดหลอมเหลว129 ^{o}C จุดเยือกแข็ง 131 ^{o}C ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ) เท่ากับ 1 ความสามารถในการละลายน้ำที่ 25 ^{o}C เท่ากับ 0.13 g/100 mL

โดยปกติออโธโทลิดีนมีความคงตัวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Stability of Reaction) ไม่เกิดอันตรายจากการสลายตัว ไม่เกิดอันตรายจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน แต่จะเข้ากันไม่ได้กับสารออกซิไดซ์ที่แรงหรือกรดเข้มข้นเพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง และควรเก็บในที่ปราศจากอากาศ แสงและความร้อน ในบางครั้งสารชนิดนี้อาจลุกไหม้ได้ถ้าได้รับความร้อนมากๆ ในระหว่างเกิดลุกไหม้จะเกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ที่เป็นพิษ นอกจากนี้ก็สามารถเกิด คาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ แอมโมเนีย ได้อีกด้วย

ออโธโทลิดีนมีค่ามาตรฐานและความเป็นพิษ (Standard and Toxicity) หรือ LD_{50} เท่ากับ 404 mg/kg เมื่อมีการสัมผัสทางหายใจจะทำให้โพรงจมูกเกิดการระคายเคือง ถ้าสัมผัสทางผิวหนังในระยะสั้นๆ จะไม่ทำให้ระคายเคืองต่อผิวหนัง ถ้ากินหรือกลืนเข้าไปปริมาณ 100 mg 3 ครั้ง จะถูกขับออกมา 5.60-7.47 mg/วัน แต่ไม่มีรายงานการเกิดผลกระทบอื่น ในกรณีที่มีการสัมผัสถูกตาจะไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับมนุษย์แต่จะคล้ายกับการระคายเคืองต่อจมูก เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่มีคุณสมบัติคล้ายกันกับสารอะโซเมติกเอมีน เช่น benzidine แล้วออโธโทลิดีนจะระคายเคืองตา และยังไม่มีการรายงานว่าการสัมผัสออโธโทลิดีนเป็นเวลานานจะมีผลก่อให้เกิดการเป็นมะเร็ง แต่จะมีการศึกษาในหนูและกระต่ายพบว่าทำให้ไตวาย และทำลายตับ [20]

การเก็บรักษาควรเก็บในภาชนะบรรจุให้มิดชิด เย็นและแห้ง มีการระบายอากาศ และควรเก็บให้ห่างจากการสัมผัสแสงอาทิตย์โดยตรง แหล่งความร้อนและแหล่งจุดติดไฟ สารที่เข้ากันไม่ได้ เช่น สารออกซิไดซ์ ประกายไฟ เปลวไฟและแหล่งจุดติดไฟอื่นๆ กรณีที่เกิดการรั่วไหลไม่ควรสัมผัสกับสารโดยตรง ไม่ให้ไหลเข้าไปในท่อระบายหรือที่อับอากาศ และเก็บส่วนที่หกรั่วไหลด้วยดิน ทราย หรือวัสดุดูดซับซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมีที่หกรั่วไหล หลังจากนั้นก็ฉีดล้างบริเวณหกรั่วไหลด้วยน้ำ การพิจารณาการกำจัดโดยต้องปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

เมื่อได้รับสารควรต้องทำการปฐมพยาบาลเบื้องต้น คือ ถ้าหายใจเข้าไป ควรมีการป้องกันอย่างระมัดระวังก่อนที่จะเข้าไปช่วยเหลือ เช่น สวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม เคลื่อนย้ายแหล่งที่มีการปนเปื้อนออกไป หรือย้ายผู้ป่วยไปที่อากาศบริสุทธิ์ ควรปรึกษาแพทย์โดยทันที ถ้ากินหรือกลืนเข้าไป ห้ามให้สิ่งใดเข้าปากถ้าผู้ป่วยหมดสติ หรือมีอาการชักอย่างรุนแรง ให้ผู้ป่วยล้างปากบ้วนปากด้วยน้ำอย่างทั่วถึง อย่ากระตุ้นทำให้เกิดการอาเจียน ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ 240 - 300 mL (8 ถึง 10 ออนซ์.) ถ้าเกิดการอาเจียนขึ้นเองให้ล้างปากด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง พาไปพบแพทย์โดยทันที ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ควรถอดเสื้อผ้าที่เปรอะเปื้อนสารเคมี รองเท้าและเครื่องหนัง เช่น สายนาฬิกา เข็มขัดออกโดยเร็วถ้าเป็นไปได้ ให้ฉีดล้างด้วยน้ำอุ่นโดยให้น้ำค่อยๆ ไหลผ่านอย่างน้อย 20 นาที หรือจนกระทั่งสารเคมีออกหมด ส่งไปพบแพทย์ทันที ทำความสะอาดเสื้อผ้า รองเท้าและเครื่องหนังก่อนที่จะนำมาใช้ใหม่หรือนำไปทิ้ง ถ้าสัมผัสถูกตา อย่าให้ผู้ป่วยถูขยี้ตา ให้น้ำไหลผ่าน

เป็นเวลา 2-3 นาที ให้ผู้ป่วยชำเลืองตาไปทางซ้าย-ขวา และขึ้นลง ถ้ามีผงหรือฝุ่นที่เอาออกไม่ได้ล้างด้วยน้ำอุ่นค่อยๆ ให้น้ำไหลผ่านอย่างน้อย 5 นาทีหรือจนกระทั่งผงหรือฝุ่นออกหมด เปิดเปลือกตาไว้ระยะหนึ่ง [20]

2.3 คลอรีน (Chlorine:Cl_2) 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 นักเคมีชาวอาหรับพบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่กรดกัดทอง (HNO_3 1 ส่วน ผสมกับ HCl 3 ส่วน) จะได้แก๊สชนิดหนึ่งมีกลิ่นฉุนแต่ไม่ทราบว่าเป็นแก๊สคลอรีน

ค.ศ. 1774 Karl W. Scheele นักเคมีชาวสวีเดน ได้รับเกียรติว่าเป็นคนแรกที่ค้นพบแก๊สคลอรีน โดยการเผาส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และกรด HCl ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$MnO_2 + 4HCl \longrightarrow MnCl_2 + Cl_2 + 2H_2O \qquad (2.1)$$

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 มีการนำแก๊สคลอรีนมาใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียเป็นครั้งแรกที่มลรัฐเพนซิลวาเนียร์

ค.ศ. 1930 อุตสาหกรรมเคมีเจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ได้มีการนำคลอรีนมาใช้งานอย่างกว้างขวางนอกเหนือจากคุณประโยชน์ในด้านการฟอกสีและฆ่าเชื้อโรคในน้ำ

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

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

2.3.1.2 ลักษณะทั่วไปของคลอรีน [26, 27]

คลอรีนในสภาวะอุณหภูมิและความดันปกติจะอยู่ในรูปแก๊สสีเขียวอ่อน ในสภาวะภายใต้ความดันจะเปลี่ยนเป็นของเหลวสีอำพัน ในสภาพแห้งคลอรีนจะไม่กัดกร่อนโลหะ แต่ถ้ามีความชื้นอยู่ด้วยจะทำให้มีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง ไม่ระเบิดและติดไฟแต่ช่วยให้ไฟติดเหมือนกับแก๊สออกซิเจน [3, 28, 29]

คลอรีนที่อยู่ในภาชนะบรรจุเป็นคลอรีนแห้ง และมีสภาพเป็นของเหลวอยู่ภายใต้ความดันสูง โดยความดันจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่วนที่เป็นของเหลวบริเวณส่วนล่างของภาชนะบรรจุจะเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊ส ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 35 ^{0}C ความดันของแก๊สคลอรีนในภาชนะบรรจุจะเท่ากับ 10 เท่าของความดันบรรยากาศ ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 65 ^{0}C ความดันแก๊สภายในจะเท่ากับ 20 เท่าของความดันบรรยากาศ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อภาชนะบรรจุ ดังนั้นควรเก็บภาชนะบรรจุคลอรีนในที่ร่มและมีอากาศถ่ายเทสะดวก [3]

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

2.3.1.3 สมบัติทางฟิสิกส์ของคลอรีน [31]

ในสถานะแก๊สจะเป็นสีเขียวอ่อน สถานะของเหลวเป็นสีเหลืองอำพัน กลิ่นฉุนแสบจมูก จุดหลอมเหลว - 101 ^{O}C จุดเดือด -34.6 ^{O}C เปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นแก๊สปริมาตรเพิ่มขึ้น 460 เท่า หนักกว่าอากาศ 2.5 เท่า ละลายน้ำได้เล็กน้อย

2.3.1.4 กระบวนการผลิตแก๊สคลอรีน [22, 32, 33]

ในอุตสาหกรรมการผลิตคลอรีนนั้นจะใช้ปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) โดยจะใช้โซเดียมคลอไรด์ที่ละลายในน้ำเป็นสารตั้งต้น กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการคลอร์อัลคาไล ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$2\ NaCl + 2\ H_2O \longrightarrow Cl_2 + H_2 + 2\ NaOH \qquad (2.2)$$

หลักการผลิตแก๊สคลอรีนก็คือใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแยกน้ำเกลือซึ่งท้ายสุดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์หลัก คือ โซดาไฟ (Caustic Soda) แก๊สคลอรีน (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 : ClO_3^-)
2. คลอไรต์ (Chlorite : ClO_2^-)
3. ไฮโปคลอไรต์ (Hypochlorite : ClO^-)
4. เปอร์คลอเรต (Perchlorate : ClO_4^-)
5. คลอรามีน (Chloramine : NH_2Cl)
6. คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide : ClO_2)

7. กรดคลอริก (Chloric acid : $HClO_3$)

8. คลอรีนโมโนฟลูออไรด์ (Chlorine monofluoride : ClF)

9. คลอรีนไตรฟลูออไรด์ (Chlorine trifluoride : ClF_3)

10. คลอรีนเพนตะฟลูออไรด์ (Chlorine pentafluoride : ClF_5)

11. ไดคลอรีนมอนอกไซด์ (Dichlorine monoxide: Cl_2O)

12. ไดคลอรีนเฮปทอกไซด์ (Dichlorine heptoxide : Cl_2O_7)

13. กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid : HCl)

14. กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid : $HClO_4$)

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

คลอรีนที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำประปา และในกระบวนการบำบัดน้ำโดยทั่วไปนอกจากอยู่ในรูปแก๊สแล้วยังมีใช้ในรูปของคลอรีนน้ำ และคลอรีนผง [40, 41] ดังนี้

แก๊สคลอรีน (Cl_2) เป็นแก๊สสีเขียว – เหลือง กลิ่นฉุน เหมาะสำหรับระบบการผลิตน้ำที่ต้องมีผู้ดูแลเป็นชำนาญการ และต้องขอใบอนุญาตการใช้

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

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

ขั้นตอนของการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำในกรณีการใช้คลอรีนผงแคลเซียมหรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำจะใช้ในอัตราส่วน 6–20 g ต่อน้ำ 1000 kg ถ้าเป็นคลอรอกซ์หรือน้ำยาฟอกสีใช้ในปริมาณ 36–120 mg ต่อน้ำ1000 kg เมื่อใส่คลอรีนไปแล้วก่อนที่จะนำน้ำไปใช้ต้องใส่เครื่องเป่าอากาศทิ้งไว้ประมาณ 3–4 วันเพื่อให้คลอรีนสลายตัวจนหมด ถ้าไม่แน่ใจว่าการสลายตัวของคลอรีนจะหมดอย่างสมบูรณ์หรือไม่ให้ใช้โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3.5H_2O$) ใส่ลงไป

ในน้ำด้วยอัตราส่วน 1 g ต่อน้ำ1000 kg เพื่อช่วยกำจัดคลอรีนที่เหลืออยู่ให้หมดไป วิธีทดสอบการตกค้างของคลอรีนในน้ำ ทำได้โดยใส่โปแตสเซียมไอโอไดด์ 2–3 เกล็ด ถ้าน้ำยังมีสีน้ำตาลคงอยู่แสดงว่ายังมีสารคลอรีนเหลืออยู่ [43]

คลอรีนอิสระตกค้างจะเกิดจากปฏิกิริยาการเติมคลอรีนลงไปในน้ำหรือที่เรียกว่า กระบวนคลอริเนชัน [44, 45] ส่วนมากจะพบได้ทั้งในน้ำประปา น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งน้ำจากสระว่ายน้ำ ซึ่งจะต้องมีการความคุมปริมาณของคลอรีนอิสระตกค้างให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เพราะถ้าปล่อยให้มีปริมาณที่เกินมาตรฐานจะทำให้เกิดอันตรายได้ ซึ่งในกระบวนการคลอริเนชันจะเกิดจากการเติมแก๊สคลอรีน คลอรีนน้ำ หรือคลอรีนผงดังแสดงในรูปที่ 2.8 [46, 47]

แก๊สคลอรีนเมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีส ให้กรดไฮโปคลอรัส และ กรดไฮโดรคลอริก ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HOCl\ (\text{hypochlorous}) + HCl \qquad (2.3)$$

กรด HOCl แตกตัวในน้ำจะให้ไฮโดรเจนไอออนและไฮโปคลอไรต์ไอออนดังแสดงในสมการที่ 2.4

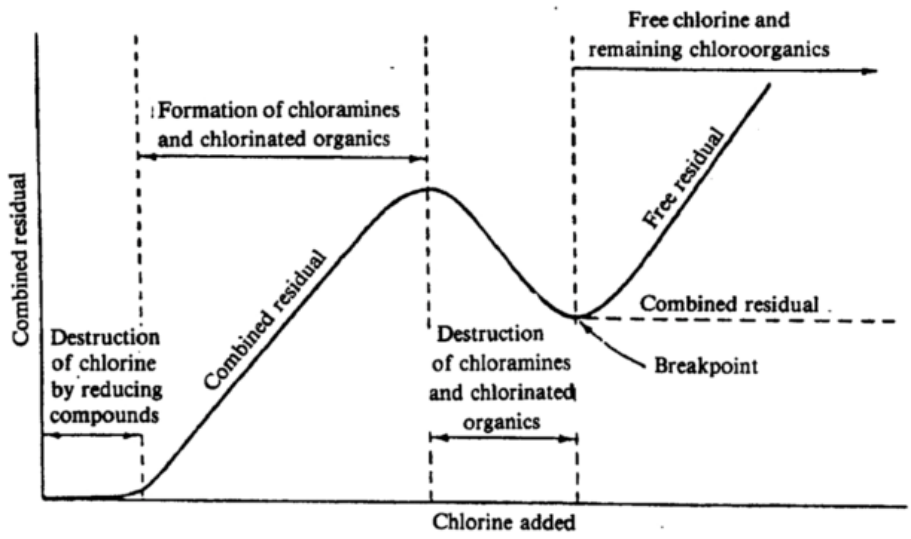
$$HOCl \rightleftharpoons H^+ + OCl^- \qquad (2.4)$$

ในกรณีที่เติมแคลเซียมไฮโปคลอไรต์ [$Ca(OCl)_2$] ลงในน้ำจะเกิดการละลายได้ดังนี้

$$Ca(OCl)_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2OCl^- \qquad (2.5)$$

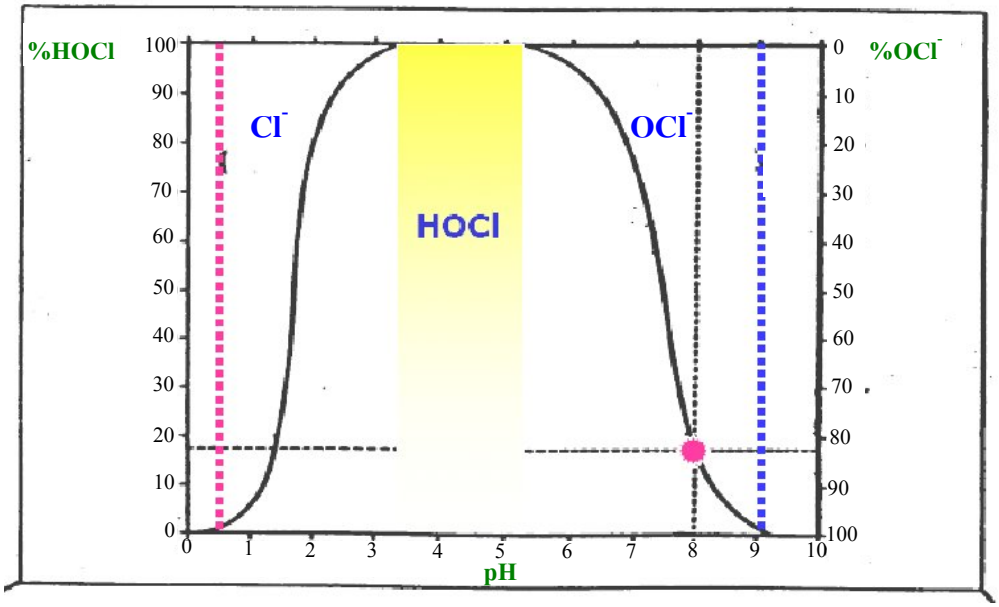
ข้อเสียในการเติมคลอรีนลงในน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reaction) กับสารอื่นๆ ในน้ำ ซึ่งจะมีผลทำให้ความสามารถในการฆ่าเชื้อลดลง โดยที่ pH ต่ำจะเกิด HOCl ที่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคดีกว่า OCl^-

Cl_2 HOCl และ OCl^- เรียกว่าคลอรีนอิสระตกค้าง ปริมาณคลอรีนอิสระตกค้างชนิดใดจะมากหรือน้อยกว่ากันจะขึ้นอยู่ที่ สภาพ 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^- และที่ pH ตั้งแต่ 9 ขึ้นไป จะอยู่ในรูป OCl^- ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลของ pH และการเปลี่ยนแปลงชนิดของคลอรีนอิสระตกค้าง [49]

คลอรีนอิสระในรูป HOCl มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากกว่าคลอรีนในรูป OCl^- ถึง 100 เท่า ดังนั้นเพื่อให้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง ควรจะมีคลอรีนในรูปของ HOCl เหลืออยู่ในน้ำตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลกสำหรับการฆ่าเชื้อโรคในน้ำทั้งแบคทีเรียและไวรัส โดยทั่วไปปริมาณคลอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5 mg/L โดยที่ pH ของน้ำต้องไม่สูงกว่า 8 และความขุ่นต้องไม่เกิน 1 NTU

2.3.3 การเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนกับแอมโมเนีย (Ammonia : NH_3) [50, 51, 52]

ในน้ำผิวดินส่วนมากจะมีแอมโมเนียเหลืออยู่ในน้ำซึ่ง Cl_2 หรือ HOCl จะสามารถทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับ pH ของน้ำ ปริมาณของแอมโมเนียและ Cl_2 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นคลอรีนอิสระตกค้างอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า คลอรามีนหรือคลอรีนอิสระคงเหลือ ได้แก่ โมโนคลอรามีน (NH_2Cl) ไดคลอรามีน ($NHCl_2$) และไตรคลอรามีน (NCl_3) [35, 36] ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความสามารถในการฆ่าเชื้อได้ต่างๆ กัน ดังแสดงในสมการที่ 2.6, 2.7 และ 2.8

$$NH_3 + HOCl \rightleftharpoons NH_2Cl + H_2O \qquad \text{monochloramine} \qquad (2.6)$$

$$NH_2Cl + HOCl \rightleftharpoons NHCl_2 + H_2O \qquad \text{dichloramine} \qquad (2.7)$$

$$NHCl_2 + HOCl \rightleftharpoons NCl_3 + H_2O \qquad \text{trichloramine} \qquad (2.8)$$

โดยจะใช้โมโนคลอรามีนและไดคลอรามีนซึ่งมีกำลังในการฆ่าเชื้อโรคมากในการวัดปริมาณคลอรีนอิสระคงเหลือในน้ำ

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

สำหรับปฏิกิริยาของคลอรีนน้ำและคลอรีนผงในน้ำ [55, 56] แสดงดังในสมการที่ 2.9 และ 2.10

$$NaOCl + H_2O \longrightarrow HOCl + NaOH \qquad (2.9)$$

$$Ca(OCl)_2 + 2H_2O \longrightarrow 2HOCl + Ca(OH)_2 \qquad (2.10)$$

การใช้คลอรีนน้ำและผง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สคลอรีน จะเห็นว่าการใช้คลอรีนน้ำและผงจะทำให้แนวโน้มของค่า pH เป็นไปในทางที่สูงขึ้น เนื่องจากตามสมการเคมีจะมีด่างเกิดขึ้น แต่การใช้แก๊สคลอรีนจะทำให้แนวโน้มของค่า pH ในน้ำต่ำลงเนื่องจากมีกรดเกิดขึ้น ดังนั้นการใช้แก๊สคลอรีนฆ่าเชื้อโรคตามทฤษฎีแล้วจะมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้คลอรีนรูปอื่น แต่ในทางปฏิบัตินั้นผลไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะปริมาณคลอรีนที่ใช้น้อยมากผลกระทบต่อ pH ของน้ำจึงค่อนข้างน้อย

<u>สรุป</u> คลอรีนในน้ำประปาทั่วไปจะมีทั้งคลอรีนอิสระตกค้าง (HOCl และ OCl^-) และคลอรามีน (Combined residual chlorine)

Total Residual Chlorine = Free residual chlorine + Combined residual chlorine

3.3.4 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของคลอรีน [35, 57, 58]

คลอรีนสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงกับสารพวกฟีนอล เกิดโมโนคลอรามีน ไดคลอรามีน และไตรคลอรามีน [51] ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำเกิดกลิ่นและรสในน้ำได้ ดังนั้น U.S. Public Health Service จึงได้มีการกำหนดค่าของสารประกอบฟีนอลในน้ำประปาจะต้องมีค่าไม่เกิน 1 μg/L

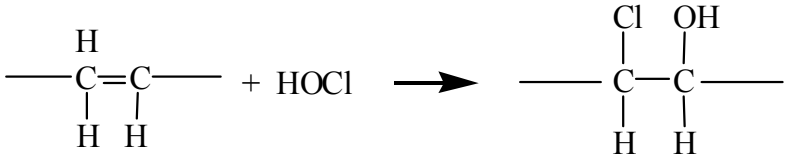
คลอรีนจะเกิดปฏิกิริยากับสารลดออกซิเจนในน้ำ เช่น H_2S, Fe^{2+}, Mn^{2+}และ NO_2^- ซึ่งเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

$$H_2S + 4Cl_2 + 4H_2O \rightleftharpoons H_2SO_4 + 8HCl \qquad (2.11)$$

$$2Fe^{2+} + Cl_2 + 6H_2O \rightleftharpoons 2Fe(HO)_3 + 2Cl^- + 6H^+ \qquad (2.12)$$

$$2Mn^{2+} + Cl_2 + 2H_2O \rightleftharpoons MnO_2 + 2Cl^- + 4H^+ \qquad (2.13)$$

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



(2.14)

คลอรีนในรูปของ HOCl และ OCl^- จะทำปฏิกิริยาธรรมชาติ (Natural Organic Matter : NOM) ที่อยู่ในน้ำ คือ ฮิวมิกแล้วเกิดสารก่อมะเร็งประเภทไตรฮาโลมีเทน [Trihalomethanes : THM เช่น $CHCl_3$ (Chloroform), $CHBr_3$ (Bromoform)] และ DBP (Disinfection By Product) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$HOCl + NOM \longrightarrow CHCl_3 + DBP \quad (2.15)$$

$$HOCl + Br \longrightarrow HOBr + Cl^- \quad (2.16)$$

$$HOBr + NOM \longrightarrow CHBr_3 + DBP \quad (2.17)$$

นอกจากนี้แล้วฮาโลเจนตัวอื่น เช่นโบรมีนก็ยังสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีนได้เกิดเป็น HOBr ซึ่งเป็นสารฆ่าเชื้อโรคและทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าคลอรีน จะมีผลทำให้มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคได้เร็วขึ้น ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

$$Br^- + HOCl \longrightarrow HOBr + Cl^- \quad (2.18)$$

2.3.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของคลอรีนอิสระตกค้าง [35, 36, 50]

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการฆ่าเชื้อโรคในน้ำคือเวลาในการสัมผัส (Contract time) และ ความเข้มข้นของคลอรีน [59, 60] ซึ่ง คลอรีนอิสระตกค้างจะหมายถึง Cl_2 , HOCl และ OCl^- โดยพบว่าที่ pH ต่ำๆ จะอยู่ในรูปของ HOCl มากกว่า OCl^- และ HOCl จะมีผลในการฆ่าเชื้อได้ดีกว่า ส่วนโมโนคลอรามีน ไดคลอรามีน และไตรคลอรามีน จะเรียกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือในกรณีที่ใช้เวลาในการสัมผัสคงที่ต้องใช้ความเข้มข้นของคลอรีนอิสระคงเหลือในการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าคลอรีนอิสระตกค้างดังนั้นจึงต้องทราบความเข้มข้นของคลอรีนอิสระตกค้าง [57]

อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่าง HOCl กับ NH_3 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ pH ซึ่งพบว่าที่ pH 8.3 จะเกิดอัตราเร็วสูงสุด และอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่อค่า pH ต่ำกว่าหรือสูงกว่านี้ ดังนั้นจึงพบว่าเวลาของการสัมผัส 10 15 หรือ 60 นาทีคลอรีนอิสระตกค้างกับคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่รวมกัน

สารประกอบคลอรามีนซึ่งเกิดจาก NH_3 กับ Cl_2 ในอัตราส่วนที่ต่างกันก็จะเกิดคลอรามีนต่างชนิดกัน เช่น ถ้าอัตราส่วนของ Cl_2 : NH_3 เป็น 1:1 จะเกิดเป็นโมโนคลอรามีนและไดคลอรามีน และพบว่าที่ pH ต่ำจะเกิดเป็นไดคลอรามีนมากกว่า ดังแสดงในสมการที่ 2.19

$$2NH_2Cl + H^+ \rightleftharpoons NH_4^+ + NHCl_2 \qquad (2.19)$$

ถ้าอัตราส่วนของ $NH_3 : Cl_2$ มากขึ้นก็จะเกิดเป็นไตรคลอรามีน และเกิดการออกซิไดส์ NH_3 บางส่วนไปเป็น N_2 โดยปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์เมื่อเติม Cl_2 2 mol ลงไปใน NH_4-N ที่อยู่ในน้ำ 1 mol โดยพบว่าจะเกิดคลอรามีนตกค้างมากที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนของ $Cl_2 : NH_3$ เป็น 1:1 และจะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนของ $Cl_2 : NH_3$ เป็น 2:1 แต่ถ้ามีการเติม Cl_2 ต่อไปเรื่อยๆ ก็จะเกิดเป็นคลอรีนตกค้าง โดยเมื่อเติมคลอรีนจนกระทั่ง NH_3 ถูกเปลี่ยนไปเป็นไตรคลอรามีน หรือถูกออกซิไดส์ไปเป็น N_2 หรือแก๊สอื่น เรียกว่า Superchlorination หรือคลอรีนอิสระตกค้าง หรือ Break-Point Chlorination

เนื่องจากไตรคลอรามีนหรือ Nitrogen trichloride (NCl_3) จะเป็นสารที่มีกลิ่น ดังนั้นจึงต้องหาวิธีควบคุมโดยการเติมคลอรีนให้มีค่ามากเกินความต้องการคลอรีนของน้ำ ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนเป็นไตรคลอรามีนให้เป็นสารที่ไม่มีกลิ่นประเภท N_2 , N_2O ดังแสดงในสมการที่ 2.20

$$NH_2Cl + NHCl_2 + HOCl \longrightarrow N_2O + 4HCl \qquad (2.20)$$

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

Superchlorination หมายถึง การเติมคลอรีนในกระบวนการบำบัดน้ำให้มีขนาดมากเกินพอเพื่อออกซิไดส์สารอินทรีย์ แมงกานีส เหล็ก และสารลดออกซิเจนในน้ำ รวมถึงการออกซิไดส์แอมโมเนียอิสระในน้ำดิบนั้น บางครั้งก็เรียกว่า คลอรีนอิสระตกค้าง หรือ Break-Point Chlorination ซึ่งคลอรีนอิสระตกค้างจะมีความว่องไวกว่าคลอรีนอิสระคงเหลือสามารถตรวจหาได้โดยวิธี Orthotolidine Arsenite Method (O.T.A. method)

2.3.7 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำ

2.3.7.1 pH ของน้ำ ดังได้กล่าวไว้แล้ว ถ้า pH สูง คลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ OCl^- ในเปอร์เซ็นต์ค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำลายเชื้อโรคต่ำลงมาก ยิ่งในกรณีน้ำจากระบบหล่อเย็นซึ่งส่วนใหญ่ pH เกือบถึง 9 ประสิทธิภาพการทำลายเชื้อโรคเกือบจะหมดไป ดังนั้นการเติมคลอรีนในน้ำหล่อเย็นประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อจะต่ำมาก

2.3.7.2 อุณหภูมิ ซึ่งอุณหภูมิมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของคลอรีนในน้ำด้วยเหตุผลหลัก 2 ประการได้แก่ ปริมาณชนิดของคลอรีนอิสระคงเหลือ กรณีที่อุณหภูมิของน้ำต่ำคลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ HOCl มาก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดเชื้อโรค ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิของน้ำ

สูง คลอรีนอิสระคงเหลือจะอยู่ในรูปของ HOCl น้อย อีกประการหนึ่งก็คือ อุณหภูมิสูงจะทำให้คลอรีนสลายตัวได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของคลอรีนต่ำลงด้วย

2.3.7.3 เวลา ถ้าเวลาที่สัมผัสน้ำ (Contact time) นานขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการค่าเชื้อโรคของคลอรีนสูงขึ้น ในทางกลับกันถ้าเวลาที่สัมผัสน้ำน้อยลงประสิทธิภาพจะต่ำลง [61]

2.3.7.4 ความเข้มข้น เช่นเดียวกับเวลาถ้าความเข้มข้นของคลอรีนสูงประสิทธิการฆ่าเชื้อโรคจะสูง

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 จะเลือกได้ว่าจะให้มีเวลาสัมผัสนานเท่าไร โดยใช้วิธีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นที่เหลือ 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 ในกรณีที่ไม่ต้องการกำจัดสารอินทรีย์ก่อน เนื่องจากความยุ่งยากในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต อาจเปลี่ยนสารฆ่าเชื้อโรคจากคลอรีนเป็นชนิดอื่นซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน

2.3.8 วิธีการวิเคราะห์หาคลอรีนอิสระ [35, 36, 50, 62]

2.3.8.1 Starch Iodine Method (หรือ Iodometric Method)

ใช้หาคลอรีนคงเหลือทั้งหมด [63] โดยที่คลอรีนอิสระตกค้างและคลอรีนอิสระคงเหลือสามารถออกซิไดส์ I^- ให้เป็น I_2 ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Cl_2^0 + 2I^- \longrightarrow I_2^0 + 2Cl^- \qquad (2.21)$$

$$I_2 + \text{Starch} \longrightarrow \text{blue color (Qualitative test)} \qquad (2.22)$$

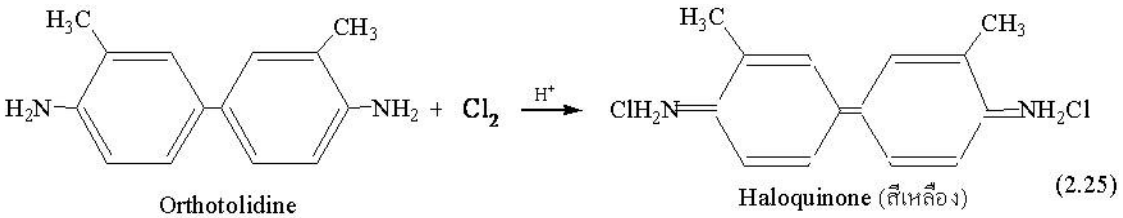
เมื่อไทเทรต I_2 ด้วยสารละลายมาตรฐาน $Na_2S_2O_3$ จะสามารถหาปริมาณของคลอรีนตกค้างได้ ซึ่ง $Na_2S_2O_3$ จะเป็นตัวลดออกซิเจน เมื่อถึงจุดยุติจะทำให้สีน้ำเงินจางหายไป ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$I_2 + 2Na_2S_2O_3 \longrightarrow Na_2S_4O_6 + 2NaI \qquad (2.23)$$

$$I_2 + 2S_2O_3^{2-} \longrightarrow S_4O_6 + 2I^- \qquad (2.24)$$

2.3.8.2 Orthotolidine Method [64, 65]

ใช้หาคลอรีนคงเหลือทั้งหมด โดยใช้สารออโธโทลิดีนทำปฏิกิริยากับคลอรีนที่อยู่ในน้ำ ในสภาวะที่เป็นกรด คลอรีน คลอรามีน และตัวเติมออกซิเจนอื่นๆ จะออกซิไดส์ออโธโทลิดีนให้กลายเป็นฮาโลควิโนน (Haloqunone) ซึ่งเป็นสารสีเหลือง โดยที่สารฮาโลควิโนนจะเกิดเป็นสีเหลืองที่ pH น้อยกว่า 1.8 และความเข้มของสีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของคลอรีนตามกฎของเบียร์ (Beer's Law) ดังแสดงในสมการที่ 2.25



Orthotolidine Haloquinone (สีเหลือง) (2.25)

2.3.8.3 Orthotolidine – Arsenite Method (O.T.A. method)

เป็นวิธีที่ใช้วัดได้ทั้งคลอรีนอิสระตกค้างและคลอรีนอิสระคงเหลือ หลักการคือ คลอรีนอิสระตกค้างจะทำปฏิกิริยากับออโธโทลิดีนได้ทันที แต่คลอรีนอิสระคงเหลือจะเกิดปฏิกิริยาภายหลัง การวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็นสองตอนคือ

ตอนที่ 1 จะหาคลอรีนคงเหลือทั้งหมดก่อน เมื่อเติมออโธโทลิดีนจะเกิดปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระหลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที จึงก็วัดความเข้มข้นที่ได้ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี (สาเหตุที่ต้องวัดหลังจาก 5 นาที เพราะคลอรีนอิสระคงเหลือจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับออโธโทลิดีนได้ทันที) โดยสารสีเหลืองที่เกิดขึ้นจะเกิดจากคลอรีนอิสระตกค้าง และคลอรีนอิสระคงเหลือ

ตอนที่2 จะหาคลอรีนอิสระตกค้างโดยเมื่อเติมออโธโทลิดีนจะเกิดปฏิกิริยาทันทีกับคลอรีนอิสระตกค้างหลังจากนั้นก็เติมโซเดียมอาร์ซีไนต์ ($NaAsO_2$) ซึ่งเป็นตัวเติมออกซิเจนที่แรงกว่าออโธโทลิดีนลงไปเพื่อหยุดการทำปฏิกิริยาของคลอรามีนกับออโธโทลิดีน (โซเดียมอาร์ซีไนต์จะทำปฏิกิริยากับคลอรามีนทันที) จึงวัดความเข้มข้นที่ได้ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี ดังนั้นสารสีเหลืองที่เกิดขึ้นจึงเกิดจากคลอรีนอิสระตกค้างอย่างเดียว [66]

ดังนั้นจากการทดลองในตอนที่ 1 และตอนที่ 2 จะสามารถหาคลอรีนอิสระคงเหลือได้ดังนี้

คลอรีนอิสระคงเหลือ = คลอรีนคงเหลือทั้งหมด (จากตอนที่ 1) - คลอรีนอิสระตกค้าง (จากตอนที่ 2)

ซึ่งจากหลักการนี้เองผู้ทำงานวิจัยจึงได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับเตรียมหลอดตรวจวัดคลอรีนอิสระตกค้าง โดยการนำเอาออโธโทลิดีน มาทำการเคลือบบนผิวของซิลิกาแล้วนำซิลิกาที่ผ่านการเคลือบมาบรรจุในหลอดแก้ว ก็จะได้หลอดตรวจวัดที่สามารถวัดปริมาณของคลอรีนอิสระตกค้าง ซึ่งเมื่อคลอรีนอิสระตกค้างทำปฏิกิริยากับออโธโทลิดีนจะเกิดเป็นสารฮาโลควิโนนที่มีสีเหลือง โดยที่จะสามารถวัดความเข้มข้นของคลอรีนอิสระตกค้างได้จากระยะทางหรือความยาวที่เกิดการเปลี่ยนสีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังในสมการที่ 2.25

2.3.8.4 Stabilized Neutral Orthotolidine (SNORT) Method

ใช้หาได้ทั้งคลอรีนอิสระคงเหลือและคลอรีนอิสระตกค้าง หลักการก็จะคล้ายกับ Orthotolidine – Arsenite Method แต่จะทำให้ออโธโทลิดีนสะเทินที่ pH 7 เพื่อลดการขัดขวางเนื่องจากคลอรีนอิสระคงเหลือ เหล็ก และไนไตรท์ โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาช้าลง และเติมตัว Stabilizer ซึ่งเป็นสารที่ช่วยให้สีที่เกิดขึ้นคงตัว

2.3.8.5 Amperometric Titration

วิธีนี้ใช้หาคลอรีนคงเหลือทั้งหมด คลอรีนอิสระคงเหลือและคลอรีนอิสระตกค้าง สารเคมีที่ใช้และการเตรียมสารจะเหมือนกับวิธี Starch Iodine Method แต่จะแตกต่างกันตรงที่ Starch Iodine Method จะให้วิธีตรวจสอบจุดยุติด้วยการไทเทรต แต่วิธีนี้ตรวจสอบจุดยุติด้วยเครื่องแอมเพอโรเมทริกไทเทรเตอร์ (Amperometric Titrator) ซึ่งการทำงานของเครื่องนี้จะอาศัยหลักการของโพลาโรกราฟิก (Polarographic) การที่จะตรวจสอบว่าเป็นคลอรีนแบบใดนั้นจะใช้ช่วง pH ในการไทเทรตที่แตกต่างกัน คือ 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 ไทแทรนท์

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 ยาฆ่าแมลง ใช้ฟอกสีเยื่อกระดาษ ตลอดจนเส้นใยผ้า ยังใช้เป็นสารฆ่าเชื้อโรคในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะราคาไม่แพงและนอกจากนี้คลอรีนมีข้อได้เปรียบสารอื่นๆที่ใช้ฆ่าเชื่อโรคในน้ำหลายประการได้แก่

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

2.3.9.2 ข้อเสียของคลอรีน [25, 49, 71]

ถึงแม้ว่าคลอรีนจะมีประโยชน์มากมายก็ตาม แต่ถ้าใช้ในระดับความเข้มข้นที่เกินมาตรฐานแล้วก็มีผลเสียได้มากเหมือนกัน โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อ ถ้าไม่มีกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งอย่างถูกต้องแล้วปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมก็จะทำให้มีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ โดยเฉพาะคลอรามีนจะคงความเป็นพิษได้นานกว่าคลอรีนอิสระ และพบว่าไดคลอรามีนจะมีพิษรุนแรงที่สุด ส่วนกรดไฮโปคลอรัสจะมีพิษมากกว่าอิออนของไฮโปคลอรัส ผลเสียของคลอรีนได้แก่

1. กรณีที่น้ำมีปริมาณสารอินทรีย์สูง จะทำให้สิ้นเปลืองคลอรีนมาก เพราะว่าคลอรีนส่วนหนึ่งจะไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ นอกจากนี้คลอรีนที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์จะให้ผลิตภัณฑ์พลอยได้พวก THMs ซึ่งเป็นสารพิษ เป็นโทษต่อร่างกาย

2. ในกรณีที่น้ำมีค่า pH สูงเกิน 8 ขึ้นไปประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคจะลดลงเนื่องจากคลอรีนอิสระจะอยู่ในรูปของ OCl^- ดังนั้นการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนต้องปรับ pH ไม่ให้สูงเกินไป

3. คลอรีนไม่มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อ Protozoa จำพวก Giardia sp. และ Cryptosporidium sp

4. คลอรีนเมื่อมีความชื้นจะกัดกร่อนโลหะเกือบทุกชนิด เป็นอันตรายแก่อวัยวะของร่างกาย เช่น ตา จมูก ผิวหนัง เมื่อถูกคลอรีนจะอักเสบและบวมพอง ถ้าสูดดมเข้าไปจะเกิดอาการอึดอัดหายใจไม่สะดวก เจ็บคอ แน่นหน้าอก และอาจทำให้เสียชีวิตถ้าสูดดมในปริมาณมากเกินไป

5. กรณีที่ใช้คลอรีนในสระว่ายน้ำในปริมาณเกินมาตรฐานกำหนดนอกจากจะทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์แล้วก็ยังจะเกิดอันตรายต่อผู้ว่ายน้ำได้เหมือนกัน เช่น ระคายเคืองตาและโพรงจมูก กัดกร่อนฟัน หรือกรณีที่หญิงมีครรภ์กลืนกินเข้าไปจะทำให้เป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์วัย 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

มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดปริมาณของสารเคมีสำหรับสระว่ายน้ำที่ใช้และยอมรับกันก็คือมาตรฐานที่กำหนดขึ้นของสถาบันสระว่ายน้ำแห่งชาติ (National Spa and Pool Institute) แต่ก็จะขึ้นอยู่กับมาตรฐานทางด้านสาธารณสุขของแต่ละแห่งด้วยดังแสดงในตารางที่ 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 และลิเทียมไฮโปคลอไรต์)	80–100
5	Total Alkalinity (เมื่อใช้แก๊สคลอรีน ไดคลอโร ไตรคลอโร และสารประกอบโบรมีน	100–120
6	ของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolve Solid)	1000–1200
7	ความกระด้าง (Calcium Hardness)	200–400
8	กรดไซยานูริค (Cyanuric Acid)	30–50

2.3.10.2 มาตรฐานทางเคมีของน้ำประปา

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาของการประปานครหลวง (ตามข้อแนะนำขององค์การอนามัยโลก ปี 2536) [73]

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

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

ลำดับ	ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย (units)	ค่ามาตรฐาน
	- ไนเตรทในรูปไนเตรท (Nitrate as NO_3-)	mg/L	50
	- ไนไตรท์ในรูปไนไตรท์ (Nitrite as NO_2-)	mg/L	3
	- คลอรีนอิสระตกค้าง (Free residual chlorine)	µg/L	> 0.2
	- เบนซีน (Benzene)	µg/L	10
	- คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon Tetrachloride)	µg/L	2
	- ไดโครโรมีเทน (Dichloromethane)	µg/L	20
	- หนึ่ง, สอง-ไดโครโรอีเทน (1,2-Dichloroethane)	µg/L	30
	- เบนโซไพรีน (Benzo[a]pyrene)	µg/L	0.7
	- ไมโครซีสติน-แอลอาร์ (Microcystin-LR)	µg/L	1
3	**สารเคมีที่ใช้ป้องกันและกำจัดศัตรูพืช (Pesticides)**		
	- อัลดรินและดิลดริน (Aldrin/Dieldrin)	µg/L	0.03
	- คลอเดน (Chlordane)	µg/L	0.2
	- ดีดีที (DDT)	µg/L	2
	- สอง,สี่-ดี (2,4-D)	µg/L	30
	- เฮปตาคลอและเฮปตาคลออีพอกไซด์ (Heptachlor and Heptachlor epoxide)	µg/L	0.03
	- เฮกซะคลอโรเบนซิน (Hexachlorobenzene)	µg/L	1
	- ลินแดน (Lindane)	µg/L	2
	- เมททอกซิคลอ (Methoxychlor)	µg/L	20
	- เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	µg/L	9
4	**ไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethanes) sum of the ratio**	-	1
	- คลอโรฟอร์ม (Chloroform , $CHCl_3$)	µg/L	200
	- โบรโมไดคลอโรมีเทน (Bromodichloromethane , $CHBrCl_2$)	µg/L	60
	- ไดโบรโมคลอโรมีเทน (Dibromochloromethane , $CHBr_2Cl$)	µg/L	100
	- โบรโมฟอร์ม (Bromoform , $CHBr_3$)	µg/L	100
5	**กัมมันตภาพรังสี (Radioactive)**		
	- ความแรงรวมรังสีแอลฟา (Gross alpha activity)	Bq/L	0.1
	- ความแรงรวมรังสีเบตา (Gross beta activity)	Bq/L	1

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 หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง 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 หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 mg/L
4	อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40 °C
5	สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6	ซัลไฟด์ (Sulfide as H_2S)	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 หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 mg/L
9	ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
10	สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 mg/L
11	สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด
12	ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20 °C (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 mg/L หรือแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 mg/L

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

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

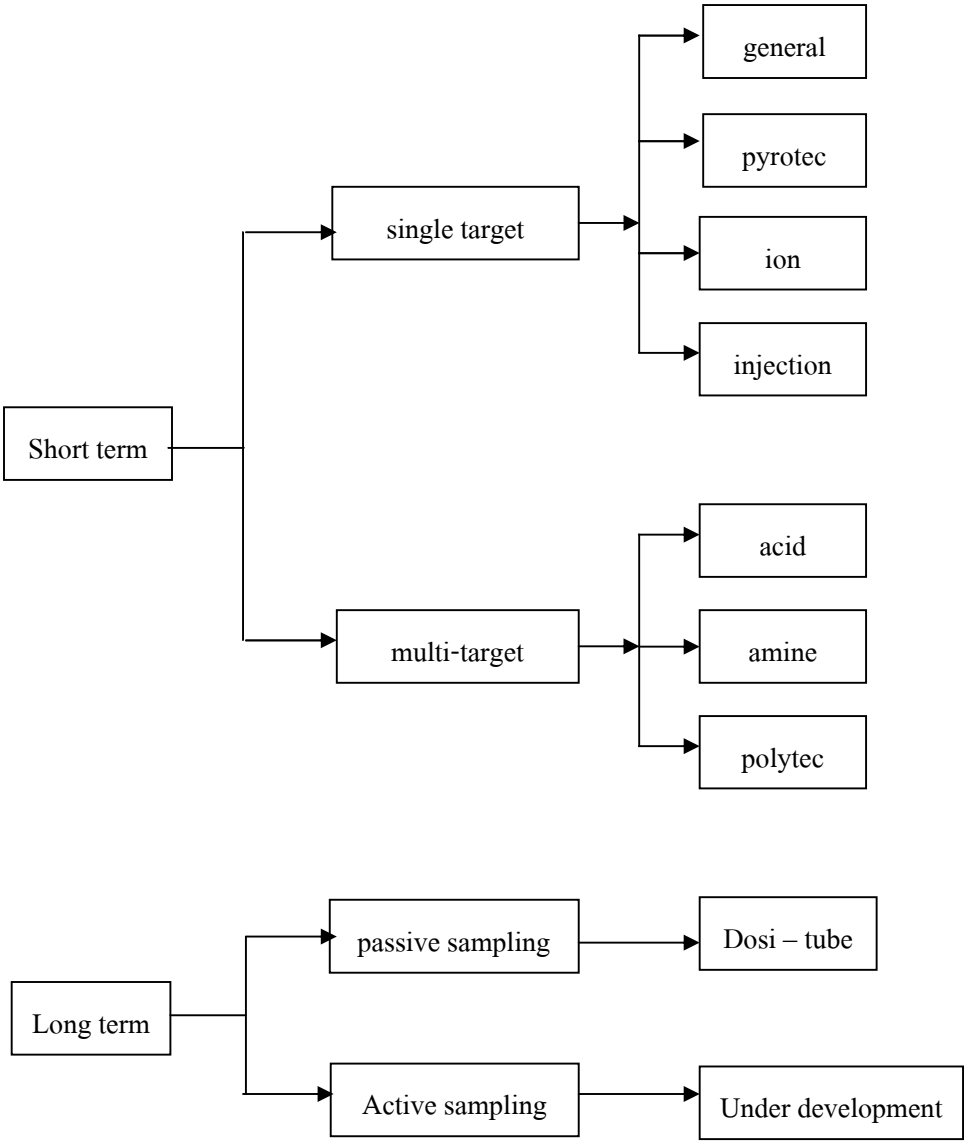
การใช้หลอดตรวจวัดมีข้อได้เปรียบหลายอย่าง เช่นสามารถวิเคราะห์สารแทนการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือราคาแพง มีความสลับซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูง แต่ถ้าใช้หลอดตรวจวัดแทนจะลดค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก และที่สำคัญคือเวลาในการวิเคราะห์ก็ยังน้อยกว่าอีกด้วย

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

ในปี ค.ศ. 1970 ประเทศญี่ปุ่นได้มีการพัฒนาหลอดตรวจวัดให้สามารถอ่านความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลข้างหลอด [75] จึงทำให้ปัจจุบันนี้สามารถอ่านความเข้มข้นของสารที่ตรวจวัดได้เร็วโดยนำมาเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร ต่อมาก็ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัดสำหรับวัดมลพิษในน้ำและใต้ดินสำหรับตรวจวัดมลพิษที่บริเวณเขตนิคมอุตสาหกรรมในประเทศแคนนาดา

หลอดตรวจวัดที่มีการผลิตขายตามท้องตลาดในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้สำหรับวัดสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส ซึ่งจะสามารถวัดได้ถึงระดับ ppm ประสิทธิภาพของการตรวจวัดก็เทียบเท่ากับวิธีทางสเปกโทรโฟโตเมทรี และนอกจากนี้แล้วยังสะดวกในการใช้งาน สามารถพกพาไปตรวจวัดได้โดยไม่ต้องยุ่งยากในการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้แล้วยังใช้เวลาในการตรวจวัดเร็ว ทำให้ประหยัดได้ทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์สารตัวอย่างได้อย่างมาก

2.4.1 ชนิดของหลอดตรวจวัด [77, 78, 79]



รูปที่ 2.10 ชนิดของหลอดตรวจวัดแบบต่างๆ [80]

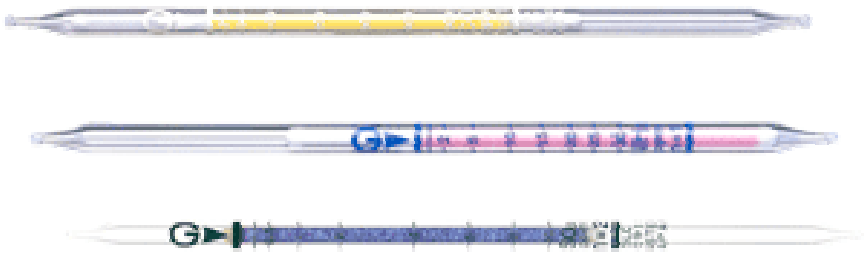
2.4.1.1 Standard Detector Tubes

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

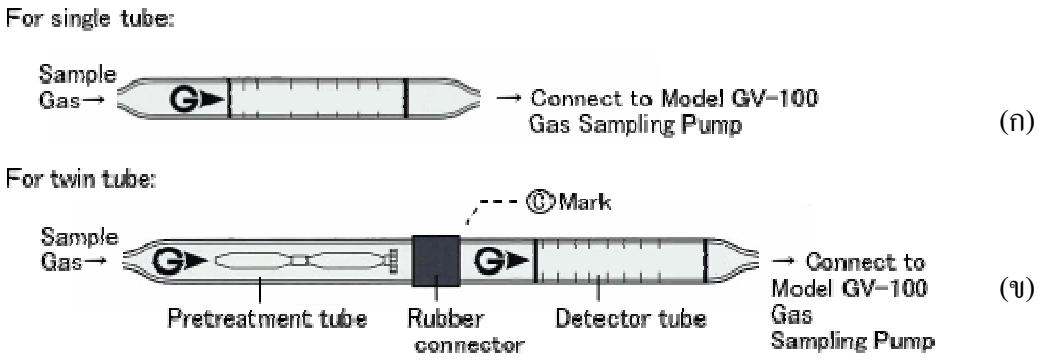
หลอดตรวจวัดที่จะผลิตขึ้นในอนาคตจะมีการทำสเกลไว้ข้างหลอด ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถอ่านความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัดได้โดยตรงจากสเกลข้างหลอด ภายในหลอดจะบรรจุด้วยรีเอเจนท์ตรวจวัดที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างได้ง่าย แล้วได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสี ข้อดีของหลอดตรวจวัดคือใช้งานง่าย และรวดเร็ว ในการตรวจวัด เพราะสามารถอ่านความเข้มข้นได้จากระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของรีเอเจนท์ตรวจวัดหลังจากที่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง

หลอดตรวจวัดจะถูกปิดปลายทั้ง 2 ข้างหลังจากกำหนดสเกลเพื่อป้องกันไม่ให้รีเอเจนท์ตรวจวัดที่บรรจุอยู่ภายในหลอดถูกทำลายหรือทำปฏิกิริยากับสารอื่นในอากาศ ทำให้การใช้งานง่าย ซึ่งก่อนที่จะนำมาใช้งานจะต้องมีการหักปลายทั้ง 2 ข้าง แล้วก็เสียบหลอดตรวจวัดต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศที่มีแก๊สที่ต้องการตรวจวัดอยู่แล้ว หลังจากนั้นก็ดันตัวอย่างแก๊สเข้าไปในหลอด แก๊สตัวอย่างก็จะไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสี 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 ข้อดีของหลอดตรวจวัดชนิดนี้คือจะไม่มีตัวรบกวนจากสารอื่นเข้ามาทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดนอกจากสารที่ต้องการตรวจวัดเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 Standard Detector Tubes แบบต่างๆ [77, 81]



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

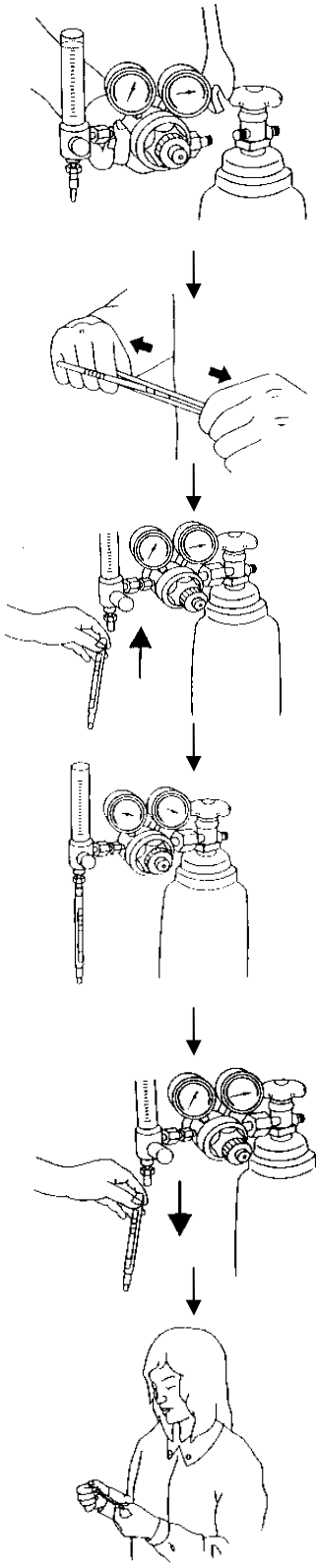
รูปที่ 2.14 Polytec Tubes ที่ต่อเข้ากับ PYROTEC Pyrolyzer และปั๊มสุญญากาศ [85]

2.4.1.4 Breathing Air Tubes

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

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

รูปที่ 2.15 Breathing Air Tubes ที่ต่อเข้ากับถังแก๊สเพื่อวัดสารปนเปื้อนที่อยู่ในถังแก๊ส [86]



จัดชุดถังแก๊สที่ต้องการตรวจวัดสารด้วยหลอดตรวจวัด

หักปลายของหลอดตรวจวัดทั้ง 2 ข้าง

ใส่หลอดตรวจวัดเข้าไปที่ rubber tube holder ซึ่งต่อจาก flow meter ให้อยู่ในแนวตั้ง 90 องศา

หมุน cylinder หรือ compressor เพื่อตรวจสอบ flow meter ว่าแก๊สไหลผ่านเข้าไปในหลอดตรวจวัดหรือไม่

หลังจากผ่านแก๊สเข้าไปในหลอดตรวจวัดดึงหลอดตรวจวัดออกจาก rubber tube holder

อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

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 และบริเวณปลายทั้งสองข้างของหลอดจะถูกปิดเพื่อป้องกันรีเอเจนท์ตรวจวัดที่อยู่ภายในหลอดถูกทำลายหรือทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อต้องการใช้งานจึงหักปลายทั้ง 2 ข้างแล้วจึงนำไปตรวจวัดสารที่ต้องการได้เลย

2.4.2.2 รีเอเจนท์ตรวจที่บรรจุวัดภายในหลอดจะเกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่างแล้วได้สารที่มีสีสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า และระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนสีจะบอกถึงความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ส่วนใหญ่จะนำรีเอเจนท์ตรวจวัดมาเคลือบบนซิลิกาแล้วจึงบรรจุลงในหลอดแก้ว

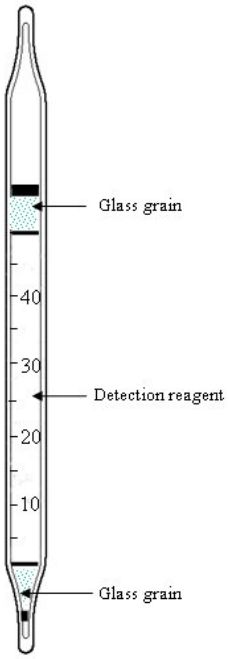
2.4.2.3 Glass grain เป็นส่วนที่ไม่เคลือบด้วยรีเอเจนท์ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งส่วนที่ไม่ถูกเคลือบจะไม่มีการทำสเกลไว้

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

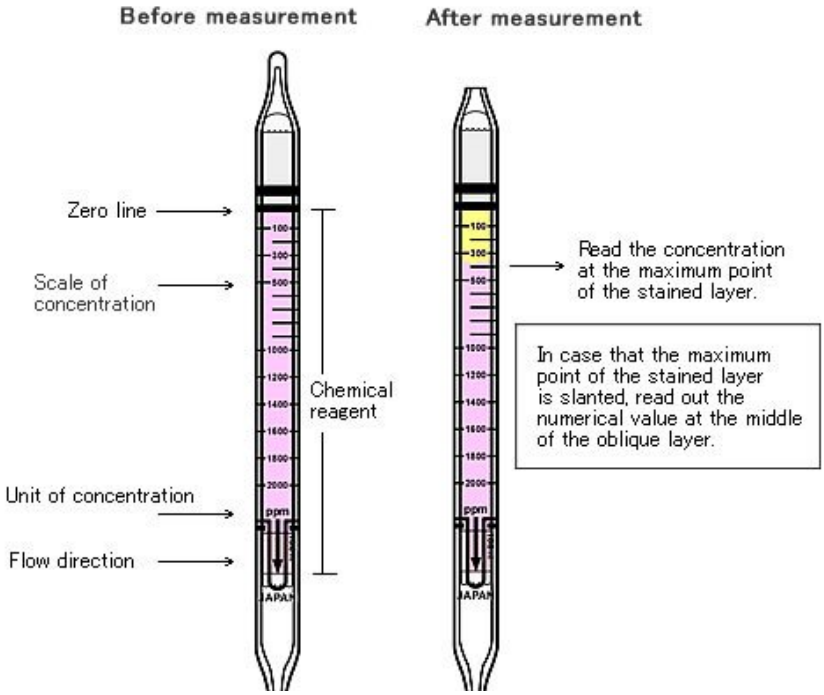


รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของหลอดตรวจวัด [91]

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 ดึงก้านกระบอกสูบออกให้สุดแล้วล็อคไว้ 1 นาที ปลดล็อคให้ก้านกระบอกสูบกลับที่เดิมถ้าลูกสูบวิ่งกลับไปตำแหน่งเดิม แสดงว่าปั๊มสุญญากาศไม่รั่ว

ข. นำหลอดตรวจวัดในข้อ ก. มาตัดปลายทั้ง 2 ข้าง โดยใส่ในช่องสำหรับตัดปลายหลอดตรวจวัดที่อยู่ข้างกระบอกสูบ

ค. ใส่หลอดตรวจวัดที่ตัดปลายแล้วไว้ที่ปากกระบอกสูบ ให้ลูกศรที่ข้างหลอดตรวจวัดชี้เข้าทางกระบอกสูบ

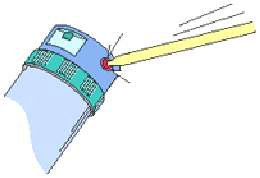
ง. ดันก้านกระบอกสูบให้สุดเพื่อไม่ให้มีอากาศค้างอยู่ภายในกระบอกสูบ แล้วดึงก้านกระบอกสูบออกเพื่อนำอากาศเข้า สามารถนำอากาศเข้าเพียงครึ่งกระบอกสูบ (50 mL) หรือนำอากาศเข้าเต็มกระบอกสูบ (100 mL) จึงล็อคทิ้งไว้ 1 นาทีหรือนานพอที่จะให้อากาศผ่านหลอดตรวจวัดเข้ามาในกระบอกสูบจนเต็ม

จ. อ่านความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด โดยดูจากแถบสีที่เกิดขึ้นว่าตรงกับความเข้มข้นเท่าใด วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.20

ฉ. เมื่อสารที่ต้องการตรวจวัดมีความเข้มข้นน้อยมาก ควรใช้ปริมาณอากาศจำนวนมากขึ้น โดยการเก็บตัวอย่างอากาศเข้ากระบอกสูบหลายๆ ครั้งดึงก้านกระบอกสูบ 1 ครั้ง หมุน Counter Ring ทวนเข็มนาฬิกา 1 ครั้ง Counter Ring จะบอกจำนวนครั้งทั้งหมดที่ปั๊มอากาศเข้าเรียกว่าสโตรก (stroke) นำจำนวนครั้งที่ปั๊มอากาศเข้าหารค่าความเข้มข้นที่อ่านจากสเกลข้างหลอดแก้วจะได้ค่าความเข้มข้นของสารที่ต้องการตรวจวัด

ช. การเก็บตัวอย่างจะเก็บในช่วงอุณหภูมิ 0-40 $^{\circ}$C ความชื้นสัมพัทธ์ 20-90 % ไม่ต้องปรับค่าความเข้มข้นที่อ่านจากสเกลข้างหลอดตรวจวัดหรือถ้าสารเคมีที่บรรจุภายในหลอดมีความไวต่ออุณหภูมิหรือความชื้น ให้ปรับค่าความเข้มข้นที่อ่านได้โดยใช้ตารางความสัมพันธ์ที่ฉลากของหลอดตรวจวัด

หลอดตรวจวัดที่ยังไม่ได้ใช้งาน



หักปลายของหลอดตรวจวัดทั้ง 2 ข้าง

เสียบหลอดตรวจวัดเข้าไปในปั๊มสุญญากาศ

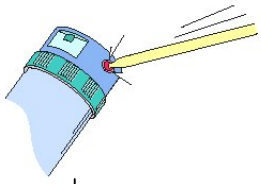
ดึงก้านกระบอกสูบออกเพื่อนำอากาศเข้า แล้วล็อคไว้ เพื่อให้ตัวอย่างแก๊สทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัด

อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

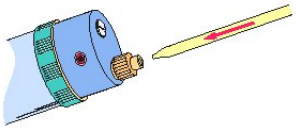
รูปที่ 2.20 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Vacuum method [95, 96]

2. Injection method ใช้กับตัวอย่างแก๊สบางชนิด ซึ่งจะดูดแก๊สเข้าไปใน syringe แล้วจึงฉีดเข้าไปในหลอดตรวจวัด วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.21

หลอดตรวจวัดที่ยังไม่ได้ใช้งาน



หักปลายของหลอดตรวจวัดทั้ง 2 ข้าง



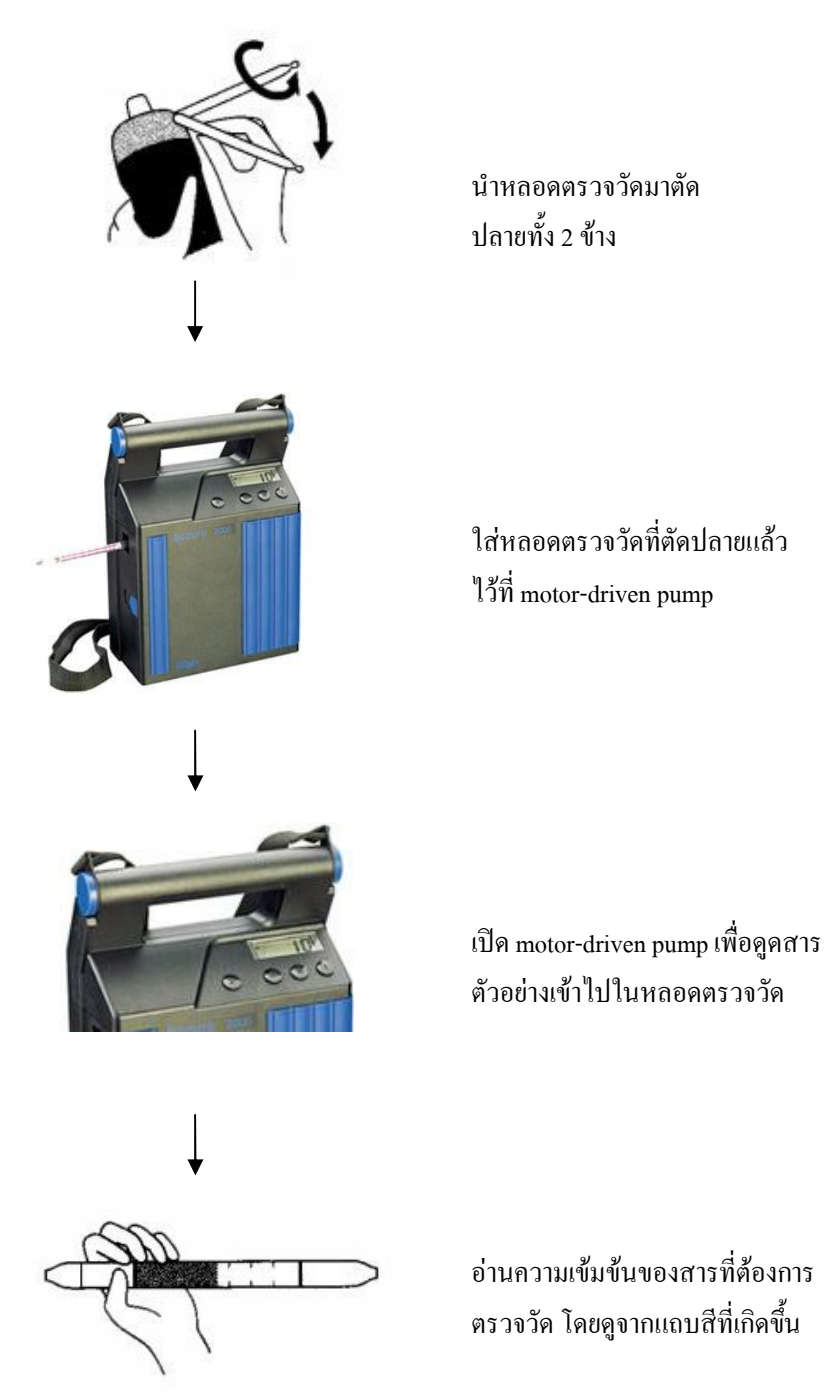
เสียบหลอดตรวจวัดเข้าไปปั๊มสุญญากาศซึ่งมีสารตัวอย่างอยู่ข้างในแล้ว

ดันสารตัวอย่างที่มีอยู่ในปั๊มสุญญากาศเข้าไปในหลอดตรวจวัด

อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.21 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Injection method [95]

3. Motor-driven pump method จะมีการดูดแก๊สตัวอย่างด้วย 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

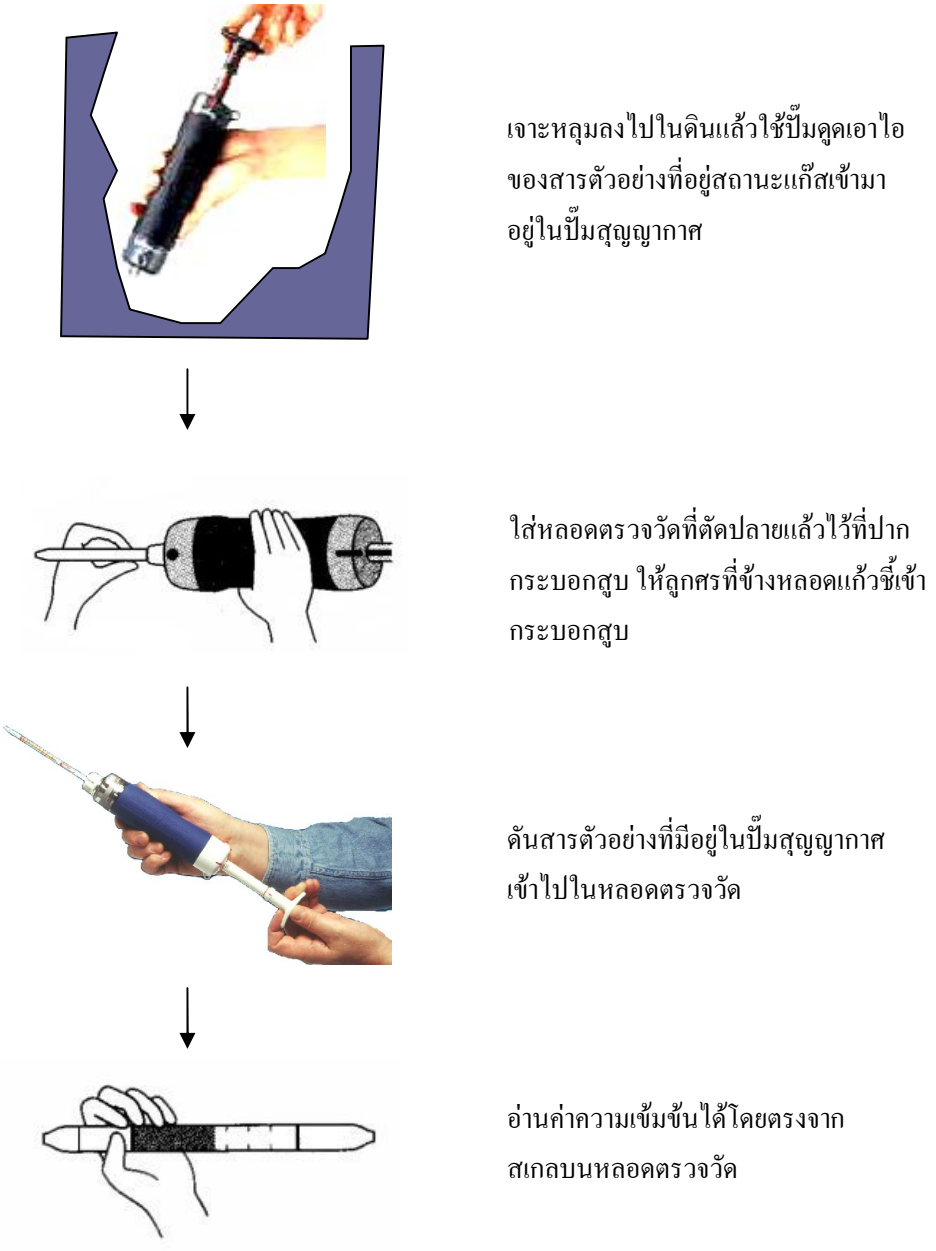
นำหลอดตรวจวัดไปวางไว้ในบริเวณที่ต้องการตรวจวัดสาร แล้วปล่อยในสารตัวอย่างแพร่เข้าไปในหลอดตรวจวัด

อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.23 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Diffusion method [98, 99]

2.4.3.2 วิธีการนำสารตัวอย่างที่อยู่ในของสารละลายหรือตัวอย่างแก๊สที่อยู่ในดินเข้าไปในหลอดตรวจวัด [75, 100]

1. Boring method เจาะหลุมเข้าไปในพื้นดินแล้วจึงเก็บสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้สำหรับวิเคราะห์แก๊สที่เป็นมลพิษทางดิน เป็นวิธีที่รวดเร็ว ง่าย และสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่าย วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.24



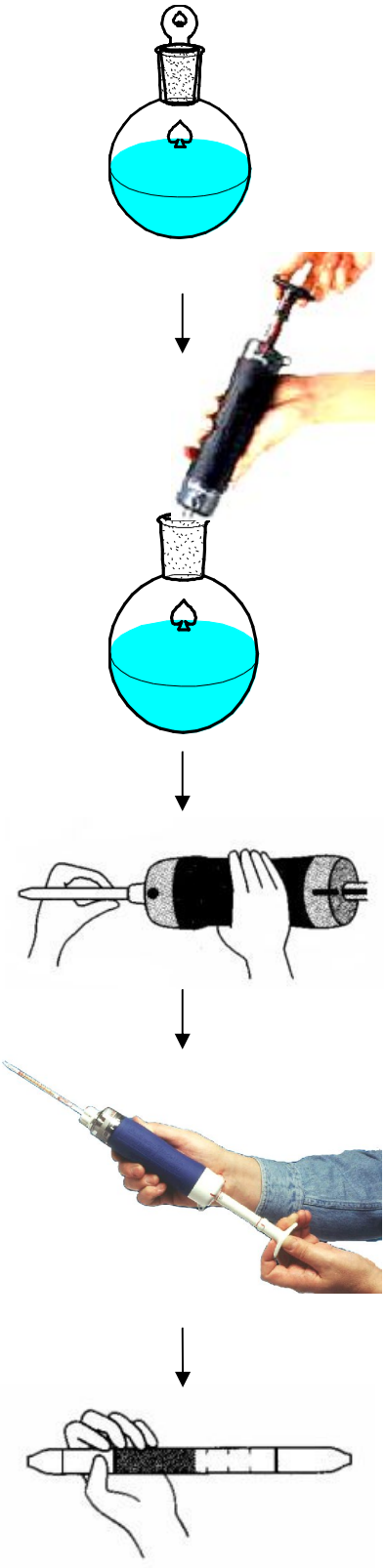
รูปที่ 2.24 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Boring method [95, 97, 101]

2. Reagent adding method จะมีการเติมรีเอเจนท์เข้าไปในตัวอย่างเพื่อเปลี่ยนให้เป็นแก๊สที่สามารถตรวจวัดได้ง่าย แล้วหลังจากนั้นจึงเก็บตัวอย่างแก๊สที่ได้ด้วยปั๊มสุญญากาศ แล้วจึงนำมาฉีดเข้าหลอดตรวจวัด วิธีนี้จะใช้กับตัวอย่างที่เป็นสลัดจ์ (sludge) หรือน้ำเสีย แต่มีข้อเสียคืออาจจะเกิดตัวรบกวนที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดเหมือนสารตัวอย่างทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของรีเจนท์ตรวจวัด หรือวัดความเข้มข้นได้มากกว่าความเป็นจริง วิธีการใช้แสดงดังรูปที่ 2.25

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

ก. multiply the reading จะอาศัยแฟกเตอร์เฉพาะของสารตัวอย่าง

ข. correct the reading จะอาศัยข้อมูลของตัวอย่างจากกราฟ



เติมรีเอเจนท์เข้าไปในสารตัวอย่างจนได้สารผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

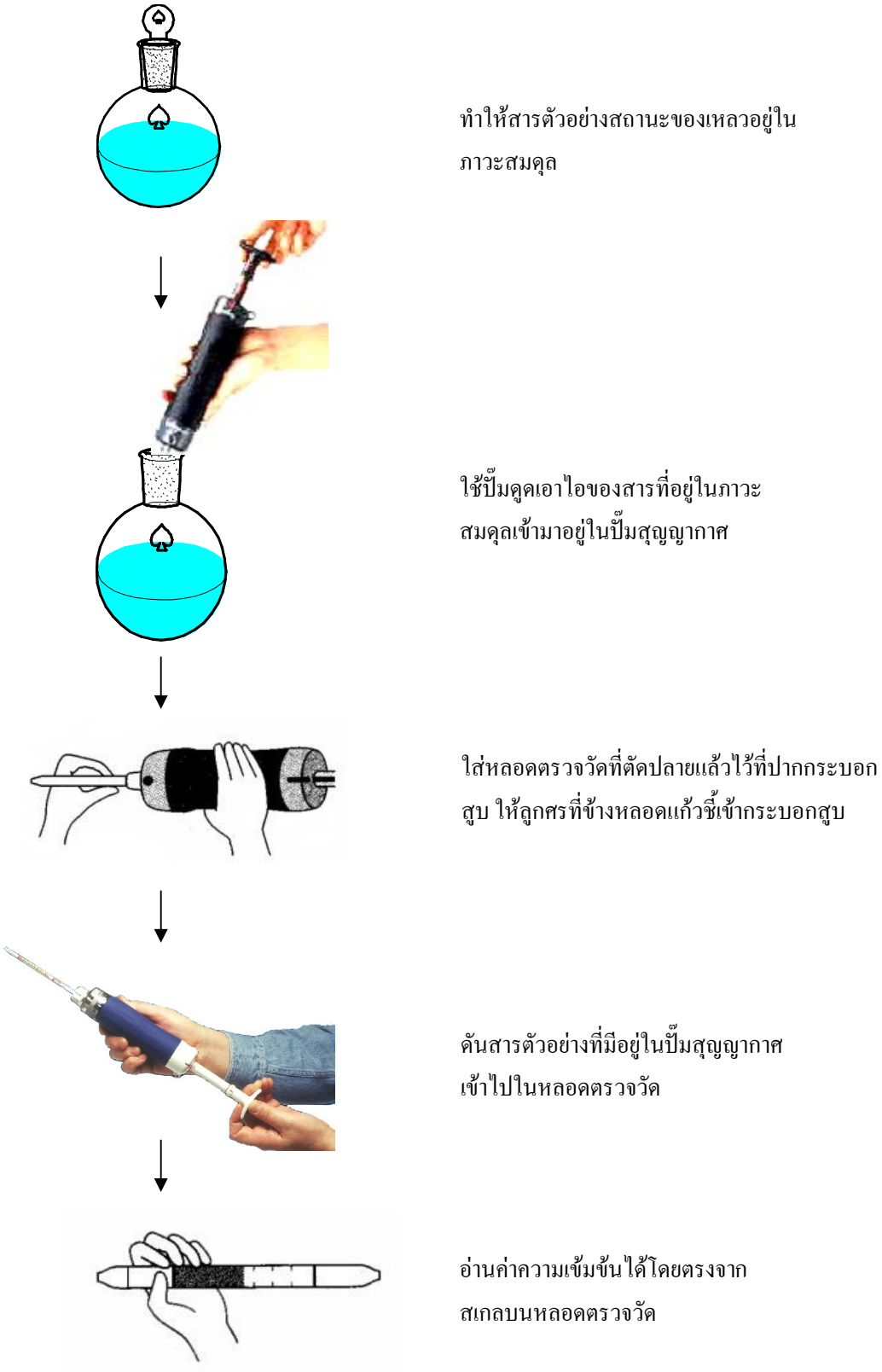
ใช้ปั๊มดูดเอาไอของสารที่เป็นแก๊สเข้ามาอยู่ในปั๊มสุญญากาศ

ใส่หลอดตรวจวัดที่ตัดปลายแล้วไว้ที่ปากกระบอกสูบ ให้ลูกศรที่ข้างหลอดแก้วชี้เข้ากระบอกสูบ

ดันสารตัวอย่างที่มีอยู่ในปั๊มสุญญากาศเข้าไปในหลอดตรวจวัด

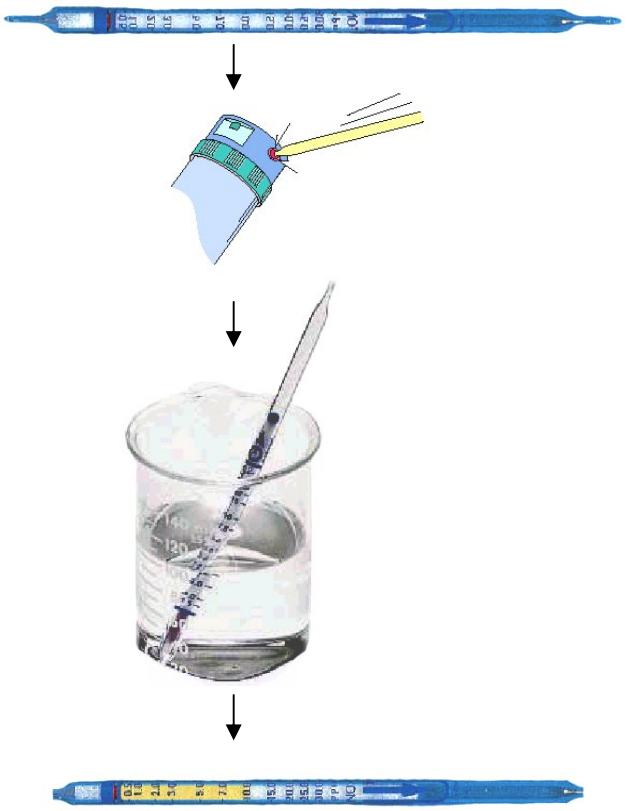
อ่านค่าความเข้มข้นได้โดยตรงจากสเกลบนหลอดตรวจวัด

รูปที่ 2.25 วิธีการใช้หลอดตรวจวัดสารตัวอย่างแบบ Reagent adding method [95, 97]



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

4. Capillary method วิธีนี้จะอาศัยหลักการของแรงดันคาปิลลารี (capillary action) เพื่อดันสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวให้เข้าไปในหลอดแก้วแคบๆ 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 ^{0}C (-94–104 ^{o}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 mmHg ที่ 25 ^{o}C (77–122 ^{o}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) จะถูกทำให้อยู่ในสภาวะที่มีความดันสูงภายในภาชนะบรรจุ ซึ่งจะเทียบกับ Japanese Industrial Standard JIS K 0007

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

เพื่อให้หลอดตรวจวัดมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูงจะต้องทำการประกันคุณภาพของหลอดตรวจวัด โดยต้องมีการวางแผนและพัฒนาทั้งในส่วนของกระบวนการผลิตและกระบวนการตรวจสอบคุณภาพ มีทั้งหมด 4 วิธี ดังนี้

2.4.5.1 การวางแผนและการพัฒนา

การพัฒนาคุณภาพของหลอดตรวจวัด ต้องมีความระมัดระวังในหลายๆ ส่วน เช่นสารที่ต้องการตรวจวัด ช่วงความเข้มข้นของการวัด และวัตถุประสงค์ของการตรวจวัด ในการพัฒนาหลอดตรวจวัดจะเน้นช่วงของการเปลี่ยนแปลงสี คือ สามารถวัดสารได้ในช่วงความเข้มข้นที่กว้างขึ้น

2.4.5.2 การเพิ่มเสถียรภาพของรีเอเจนท์ตรวจวัด

รีเอเจนท์ตรวจวัดที่ใช้จะบอกถึงประสิทธิภาพของหลอดตรวจวัด เสถียรภาพของรีเอเจนท์ตรวจวัดจะแสดงถึงระยะเวลาการเก็บหลอดตรวจวัดว่าสามารถเก็บไว้ใช้งานได้นานเพียงใด ยิ่งถ้ารีเอเจนท์ตรวจวัดมีเสถียรภาพสูงก็หมายความว่าสามารถเก็บหลอดตรวจวัดไว้ได้นาน โดยในปัจจุบันนี้สามารถเก็บหลอดตรวจวัดไว้ได้นานถึง 3 ปี

2.4.5.3 ปรับปรุงความแม่นยำ (Accuracy) ในการวัด

ข้อดีของการใช้หลอดตรวจวัดคือสามารถตรวจวัดปริมาณสารได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของหลอดตรวจวัดเช่น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอด ความต้านทานของรีเอเจนท์และอนุภาคที่บรรจุภายในหลอดต่อสารตัวอย่างที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ภายในหลอด

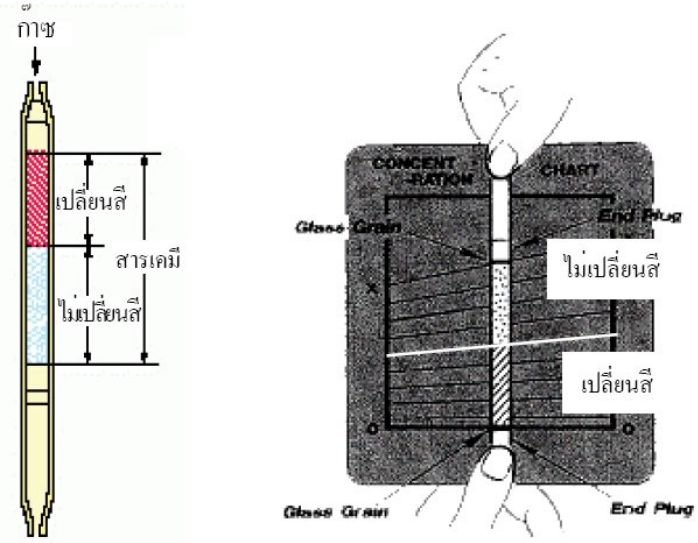
2.4.5.4 การปรับเทียบสเกล (calibration scale)

การปรับเทียบสเกลของหลอดตรวจวัดก็เหมือนกับการทำ Sampling standard gas ความเข้มข้นของสารตัวอย่างจะมีความสัมพันธ์กับระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสี 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)

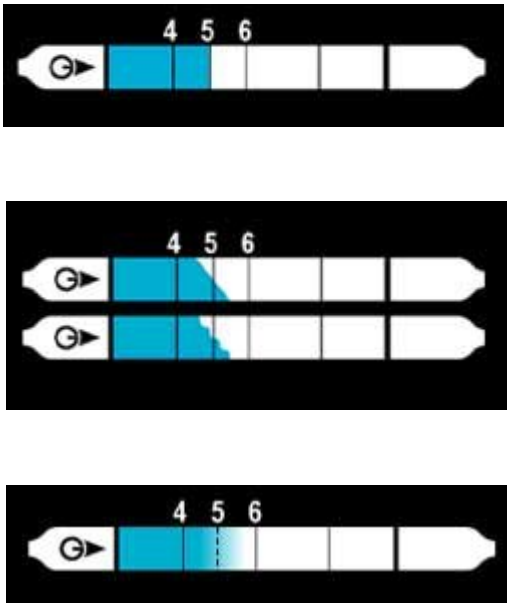
รูปที่ 2.28 การอ่านค่าความเข้มข้นของสารด้วยวิธีการอ่านจากสเกลของหลอดโดยตรง (ก) และอ่านโดยเปรียบเทียบกับ Chart ความเข้มข้นของสาร (ข) [90]

สำหรับการอ่านค่าโดยตรงจากสเกล [106] ในบางครั้งลักษณะการเปลี่ยนสีของหลอดตรวจวัดจะเกิดได้หลายแบบซึ่งจะมีวิธีการอ่านค่าได้แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.29 ดังนี้

1. แถบที่เกิดการเปลี่ยนสีที่มีลักษณะเรียบดังแสดงในรูปที่ 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]

การใช้งานหลอดตรวจวัดถ้าใส่สารตัวอย่างน้อยเกินไปจะทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีหรือไม่เห็นสีที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตัวอย่างและรีเอเจนท์ตรวจวัดได้ชัดเจน ซึ่งก็หมายความว่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่เข้าไปในหลอดตรวจวัดไม่ได้อยู่ในช่วงของสเกลบนหลอด (calibration scale) สามารถแก้ไขได้โดย

1. เมื่อไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีเกิดขึ้นหลังจากที่นำสารตัวอย่างเข้าไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดในหลอด ให้ใส่สารตัวอย่างเพิ่มเข้าไปในกระบอกสูบอีกจนกระทั่งเห็นการเปลี่ยนแปลงของสี โดยจำนวนครั้งทั้งหมดที่ปั๊มอากาศเข้าไปในกระบอกสูบ เรียกว่าสโตรก การอ่านค่าความเข้มข้นของสารตัวอย่างจะทำได้โดยนำจำนวนของสโตรกไปหารค่าความเข้มข้นที่อ่านได้จากสเกลข้างหลอดตรวจวัดก็จะได้ค่าความเข้มข้นจริงของสารตัวอย่าง เช่นถ้าใช้จำนวนของสโตรกทั้งหมด 5 ครั้งก็ให้นำความเข้มข้นที่อ่านได้มาหารด้วย 5 ก็จะได้ความเข้มข้นที่แท้จริงของสารตัวอย่าง

2. เมื่อสีที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าช่วงของสเกลบนหลอด ให้ใช้หลอดตรวจวัดอันใหม่แล้วก็ลดจำนวนของสโตรก เช่น ถ้าจำนวนของสโตรก 1 ครั้งใช้ 100 mL ก็อาจจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งหรือ

ลดลงตามความเหมาะสม แล้วนำจำนวนของสโตรกที่ลดมาคูณกับความเข้มข้นที่อ่านได้ เช่นถ้าจำนวนของ 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 ความหนาแน่นของรีเอเจนท์ตรวจวัด ความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนท์ตรวจวัดหรือผู้ใช้งาน ค่า random error จะมีความสัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นที่อ่านได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เรียกค่านี้ว่า coefficient of variation (CV) ดังแสดงในสมการที่ 2.26

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

2.4.7.2 Systematic error

เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากปั๊มสุญญากาศ ซึ่งเป็นความผิดพลาดของการปรับเทียบหลอดตรวจวัด ระยะเวลาที่ปล่อยให้สารตัวอย่างทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัด เวลาในการเก็บหลอดตรวจวัด หรือตัวรบกวน

2.4.8 ปัจจัยที่มีผลต่อความผิดพลาดของการตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัด [75, 100]

2.4.8.1 ตัวรบกวน (Interference)

หลักการเกิดปฏิกิริยาของตัวรบกวนคือถ้าสารที่นำเข้าหลอดตรวจวัดมีหลายชนิดและมีคุณสมบัติคล้ายกับสารตัวอย่าง สารนั้นก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดได้เหมือนกับสารตัวอย่างส่งผลให้ความเข้มข้นที่อ่านได้มีค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง เรียกสารชนิดนี้ว่าตัวรบกวน อิทธิพลของตัวรบกวนจะขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดภายในหลอดตรวจวัดมีทั้งหมด 3 ชนิด คือ

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

รีเอเจนท์ตรวจวัดที่บรรจุภายในหลอดสามารถเกิดปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไซยาไนด์ซึ่งเป็นตัวรบกวนได้โดยตรง จึงทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

2. Compound reaction ตัวรบกวนที่เข้าไปในหลอดตรวจวัดจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็วกับรีเอเจนท์ตรวจวัดหลายชนิดที่อยู่ภายในหลอด ถ้าตัวรบกวนที่ถูกนำเข้าไปในหลอดเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดแบบ primary reaction ก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้เหมือนกับสารตัวอย่าง จึงทำให้ความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง เช่น ตัวรบกวนของเตตตระคลอโรเอทีลีน คือ ไตรคลอโรเอทีลีน

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

2.4.8.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานหลอดตรวจวัดจะต้องอยู่ในช่วง 0–40 ^{o}C (32–104 ^{o}F) ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้หลอดตรวจวัดคือ 20^{o}C (68^{o}F) และควรจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 20 ±10 ^{o}C จึงจะทำให้ความผิดพลาดในการวัดน้อยที่สุดดังแสดงในตารางที่ 2.5 และ 2.6 เป็นความผิดพลาดของการตรวจวัดที่เกิดจากอุณหภูมิ

ตารางที่2.5 การตรวจวัด1,1,1-Trichloroethane ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน [75, 100]

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

ตารางที่2.6 การตรวจวัด Tetrachloeoethylene ที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ กัน [75, 100]

ความเข้มข้นจริงของสารตัวอย่าง (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. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของรีเอเจนท์ตรวจวัดจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 °C (68 °F) สารตัวอย่างบางชนิดจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดได้เร็ว แต่จะค่อยๆ เกิดปฏิกิริยาทำให้ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีเพิ่มขึ้นและความเข้มของสีน้อยลง ส่งผลให้ค่าที่วัดได้สูงกว่าความเป็นจริง

ข. อัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างกับรีเอเจนท์ตรวจวัด

เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 20 °C (68 °F) อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตัวอย่างและรีเอเจนท์ตรวจวัดจะเพิ่มขึ้น ทำให้ให้ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีลดลงกว่าความเป็นจริง ดังนั้นจึงทำให้ค่าความเข้มข้นของสารที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง

2. อิทธิพลของการดูดซับทางกายภาพ

ปริมาณการดูดซับทางกายภาพของสารต่อรีเอเจนท์ตรวจวัดจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสารบางส่วนจะเกิดการดูดซับทางกายภาพกับรีเอเจนท์ตรวจวัดก่อนแล้วจึงจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดได้ และจะไม่เกิดปฏิกิริยาตามปกติ (normal reaction) เป็นสาเหตุให้ระยะทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ทำให้ปริมาณของสารที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนในกรณีที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้สารเกิดการดูดซับทางกายภาพได้น้อย ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณของสารที่วัดได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริง

3. อุณหภูมิของหลอดตรวจวัดและอุณหภูมิของสารตัวอย่าง

อุณหภูมิของสารตัวอย่างจะมีผลต่อการตรวจวัดสารเหมือนกับอุณหภูมิของหลอดตรวจวัด ความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิจะเกิดจากการที่เก็บหลอดตรวจวัดไว้ที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นควรที่จะเก็บหลอดตรวจวัดที่อุณหภูมิต่ำๆ

2.4.8.4 ความผิดพลาดเนื่องจากความชื้น

หลอดตรวจวัดที่ผลิตขึ้นในทางการค้าส่วนมากจะทำการปรับเทียบสเกลที่ความชื้นที่ 50 % และจะสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงความชื้น 99 % โดยที่จะไม่มีผลกระทบต่อการตรวจวัดสาร นอกจากนี้การควบแน่นของน้ำในอากาศ และปริมาณของไอน้ำในอากาศที่ต่ำก็ไม่มีผลต่อการตรวจวัดสารเหมือนกัน

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

2.4.8.5 ความผิดพลาดเนื่องจากความดันบรรยากาศ

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

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

หรือ

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

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 ปั๊มอิเล็กโทรนิกส์ เป็นต้น ซึ่งมีราคาประมาณ 20,000-30,000 บาท ขึ้นไปส่วนหลอดตรวจวัดจะขายเป็นชุด บรรจุชุดละประมาณ 5-10 หลอด โดยราคาจะอยู่ในช่วงประมาณ 4,000 บาทขึ้นไป

2.4.11 การเก็บรักษาหลอดตรวจวัด [108]

หลอดตรวจวัดบางชนิดจะใช้รีเอเจนท์ตรวจวัดที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและรีเอเจนท์บางชนิดก็สามารถจะเกิดการสลายตัวได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการเก็บรักษาให้ถูกต้อง เพื่อไม่ให้รีเอเจนท์ตรวจวัดที่อยู่ในหลอดตรวจวัดถูกทำลาย การเก็บหลอดตรวจวัดจะเก็บที่อุณหภูมิที่เย็น (0-10 ºC หรือ 32-50 ºF) และเก็บในที่ไม่มีแสง แต่ในปัจจุบันนี้หลอดตรวจวัดบางชนิดก็สามารถเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องได้

2.4.12 การกำจัดหลอดตรวจวัด [108]

หลอดตรวจวัดที่หมดอายุหรือผ่านการใช้งานแล้วควรจะต้องมีการกำจัดอย่างเหมาะสมและถูกวิธีตามคำแนะนำของบริษัทที่ผลิต

2.4.13 การประยุกต์ใช้งานหลอดตรวจวัด [109]

หลอดตรวจวัดสามารถประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ได้อย่างกว้างขวางเช่น

2.4.13.1 ด้านความปลอดภัย (Safety) ใช้ตรวจวัดปริมาณสารที่อันตรายในบรรยากาศหรือวัดปริมาณแก๊สพิษในบริเวณที่มีการจลาจรหนาแน่น

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 สามารถเก็บหลอดตรวจวัดไว้ใช้งานได้นานถึง 3 ปี

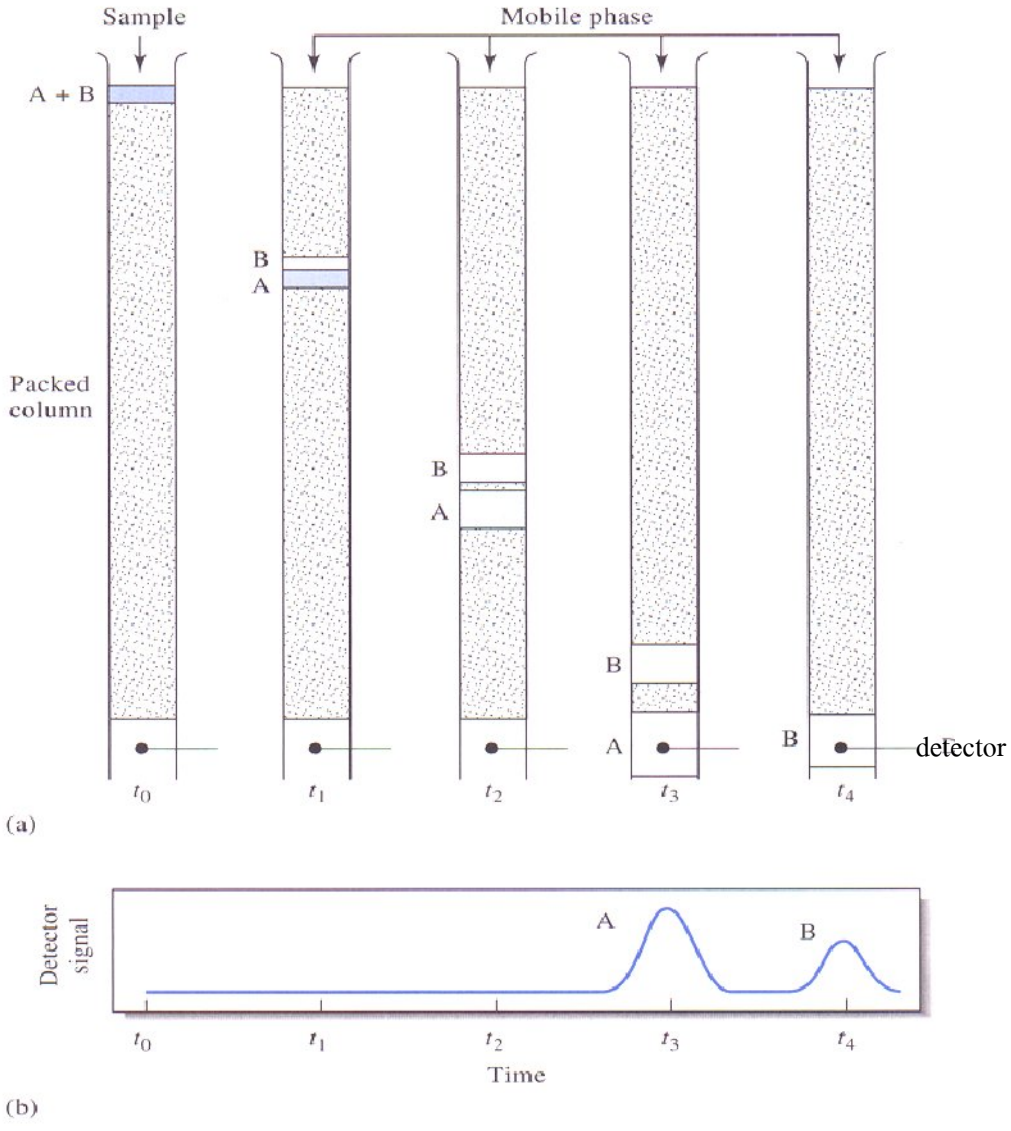
ในกรณีหลอดตรวจวัดสำหรับสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมผลิตขายมากนัก เพราะยังไม่มีการศึกษาและพัฒนาอย่างจริงจัง ดังนั้นผู้ทำงานวิจัยจึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาหลอดตรวจวัดขึ้น เพื่อให้ได้หลอดตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าสารตัวอย่างที่เป็นแก๊ส

2.5 ทฤษฎีโครมาโทกราฟีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.5.1 หลักการของโครมาโทกราฟฟี

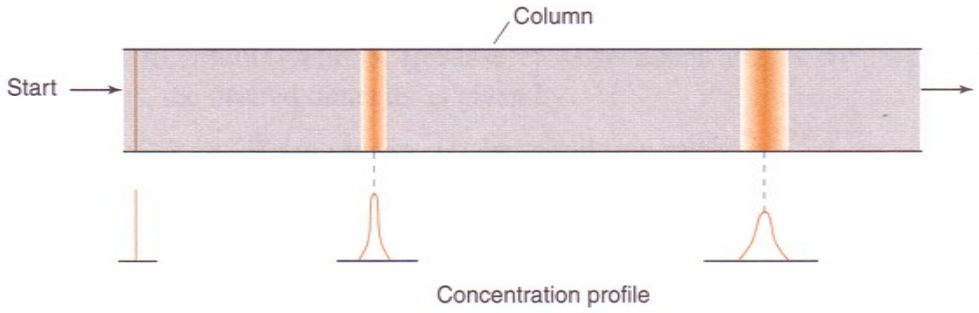
โครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสาร (Separation) ที่สามารถวิเคราะห์ทั้งในด้านคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis) และปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis) ซึ่งจะอาศัยอัตราการเคลื่อนที่ของสารที่แตกต่างกันในการแยกระหว่างเฟสสองเฟส คือ เฟสที่อยู่กับที่ (Stationary Phase) และเฟสที่เคลื่อนที่ (Mobile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

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



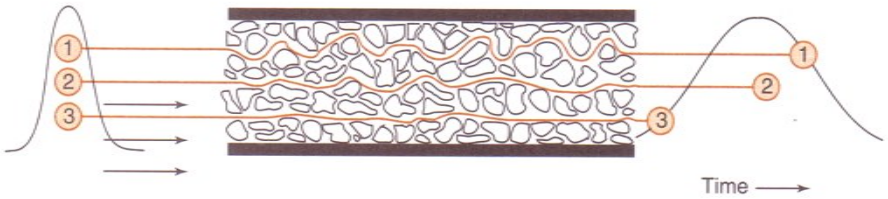
รูปที่ 2.30 การแยกสาร A ออกจาก สาร B โดยอาศัยหลักการทางโครมาโทกราฟี [113]

ความแตกต่างระหว่างอัตราการเคลื่อนที่หรือการกระจายตัวของสาร (Differential Migration) จะเกิดจากสมดุลของการกระจายตัวของสารชนิดต่างๆ (Equilibrium Distribution) ระหว่างทั้งสองเฟส การที่สารจะกระจายตัวได้ดีกว่าในเฟสใดนั้น จะขึ้นกับแรงหน่วงของโมเลกุลของสาร (Molecular Force) กับเฟสทั้งสอง คือ ถ้าสารมีแรงหน่วงเหนี่ยวกับเฟสที่อยู่กับที่มากกว่าก็จะทำให้ถูกแยกออกมาทีหลัง แต่ถ้าสารใดมีแรงหน่วงเหนี่ยวกับเฟสเคลื่อนที่ได้ดีกว่าก็จะถูกแยกออกมาก่อน กลไกของการหน่วงเหนี่ยวนั้นจะเกิดจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารตัวอย่างกับโมเลกุลของสารในแต่ละเฟส เช่น Ionic Force, Polar Force, Dispersive Force หรือ Chemical Force ตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายตัวของสารในเฟสทั้งสอง คือ องค์ประกอบของเฟสเคลื่อนที่ องค์ประกอบของเฟสอยู่กับที่ 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 ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดพีกหรือแบนด์ที่กว้างขึ้น [14]



รูปที่ 2.32 อัตราการกระจายตัวหรืออัตราการเคลื่อนที่ที่ไม่เท่ากันของสารชนิดเดียวกันซึ่งเกิดจากกระบวนการทางกายภาพ [115]

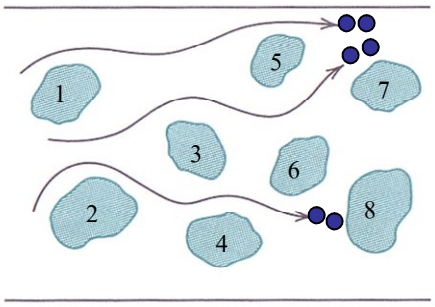
2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการแยก [117]

2.5.2.1 Initial band width

เกิดจากการที่สารตัวอย่างเข้าไปในคอลัมน์ไม่พร้อมกัน โดยที่สารตัวอย่างจะเข้าไปในลักษณะที่เป็นแถบกว้างเล็กน้อย ซึ่งความกว้างของแถบเริ่มต้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความกว้างของพีกของสารที่ถูกพาออกจากคอลัมน์ ถ้าความกว้างของแถบเริ่มต้นกว้างก็จะทำให้พีกของสารที่ถูกพาออกจากกคอลัมน์ (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

การกระจายตัวของแถบโมเลกุลของสารจะขึ้นอยู่กับขนาดและความสม่ำเสมอของอนุภาคของวัสดุที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ (packing material) แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับอัตราความเร็วของการไหลของเฟสเคลื่อนที่

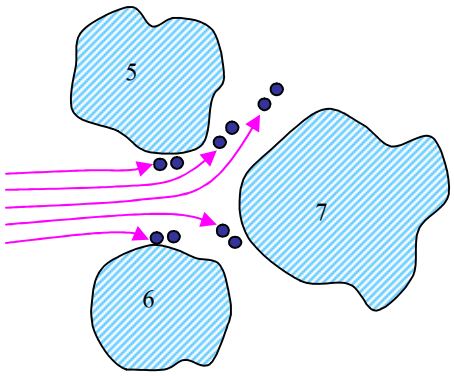
การลดการกระจายของแถบโมเลกุลของสารจาก Eddy diffusion จะสามารถทำได้โดยใช้วัสดุบรรจุในคอลัมน์ให้มีอนุภาคขนาดเล็ก สม่ำเสมอและควรเป็นชนิด Spherical จะดีกว่า Irregular เพราะจะทำให้การบรรจุวัสดุในคอลัมน์สม่ำเสมอกว่า

2.5.2.3 Mass transfer

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

1. Mobile phase mass transfer

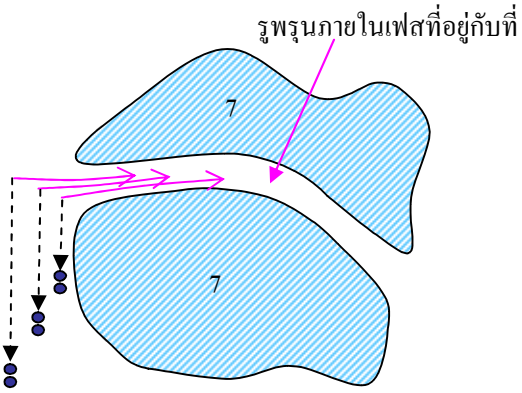
เกิดจากกระแสการไหลของเฟสเคลื่อนที่ไหลผ่านไปรอบๆ อนุภาคของเฟสที่อยู่กับที่ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน คือ ส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่อยู่แนบกับเฟสอยู่กับที่จะไหลหรือเคลื่อนที่ช้ากว่าส่วนของเฟสเคลื่อนที่ที่อยู่ตรงกลางของการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าเฟสเคลื่อนที่ไหลบริเวณตรงกลางช่องว่างระหว่างอนุภาคจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าที่ไหลใกล้ๆ กับพื้นผิวของอนุภาค



รูปที่ 2.34 การเกิด Mobile Phase Mass Transfer [117]

2. Stagnant mobile phase mass transfer

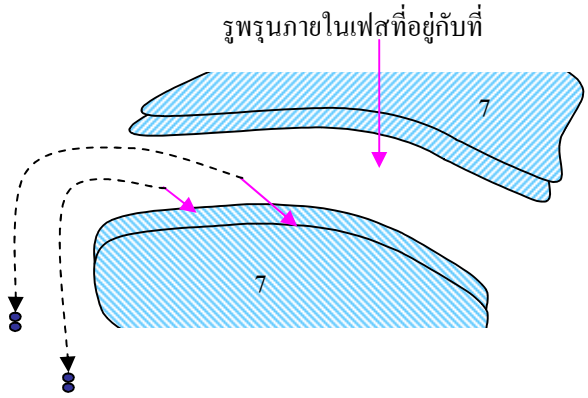
เกิดจากการที่เฟสเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในรูพรุนของอนุภาคของเฟสที่อยู่กับที่ (ในกรณีที่ใช้วัสดุที่มีรูพรุน) บางโมเลกุลของเฟสเคลื่อนที่จะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนนี้ด้วย การเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนโดยการแพร่ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนผ่านคอลัมน์ได้ช้ากว่าโมเลกุลที่อยู่นอกรูพรุน จะทำให้เกิดการกระจายของแถบโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.35 จะเห็นว่าที่รูพรุนของอนุภาคที่ 7 เฟสเคลื่อนที่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ และถ้าแพร่บริเวณที่ไม่ลึกก็จะเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วกว่า และส่วนที่แพร่เข้าไปในบริเวณที่ลึกจะเคลื่อนที่ออกมาได้ช้ากว่า



รูปที่ 2.35 การเกิด Stagnant mobile phase mass transfer [117]

3. Stationary phase mass transfer

เกิดจากความแตกต่างของอัตราเร็วของโมเลกุลของสารที่เคลื่อนเข้าไปในเฟสที่อยู่กับที่ และหลังจากที่เกิดการแพร่แล้วยังสามารถแทรกซึม (Penetrate) เข้าไปในอนุภาคของเฟสที่อยู่กับที่ได้อีกด้วย หรืออาจจะเข้าไปเกิดอันตรกิริยา (Interaction) แบบใดแบบหนึ่งได้ด้วย ถ้าโมเลกุลใดแทรกซึมเข้าไปลึกก็จะติดอยู่กับเฟสที่อยู่กับที่ได้นาน แต่ถ้าโมเลกุลใดที่แทรกซึมเข้าไปไม่ลึกก็จะเคลื่อนที่ออกมาก่อนได้ดังแสดงในรูปที่ 2.36 จะเห็นว่าที่รูพรุนของอนุภาคที่ 7 นอกจากเฟสเคลื่อนที่จะแพร่เข้าไปในรูพรุนได้แล้วยังเกิดการแทรกซึมเข้าไปในอนุภาคได้อีกด้วย และถ้าแทรกซึมเข้าไปในบริเวณที่ไม่ลึกก็จะเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วกว่า และส่วนที่แทรกซึมเข้าไปในบริเวณที่ลึกจะเคลื่อนที่ออกมาได้ช้ากว่า



รูปที่ 2.36 การเกิด Stationary phase mass transfer [117]

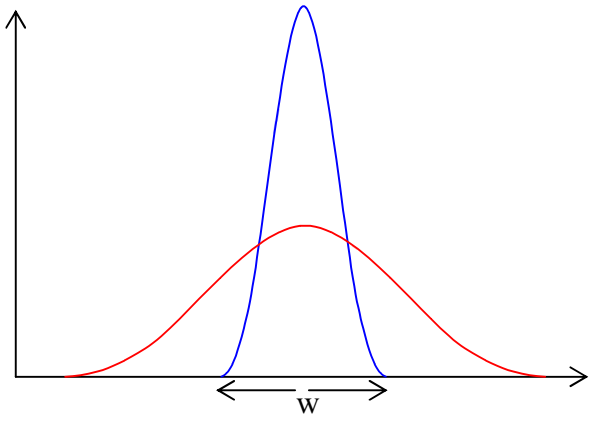
การลด Mass transfer สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของการเคลื่อนที่ออกจากเฟสอยู่กับที่ ดังต่อไปนี้

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

$$X_m \rightleftharpoons X_s \qquad (2.29)$$

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

เมื่อ X_s = สารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสที่อยู่กับที่

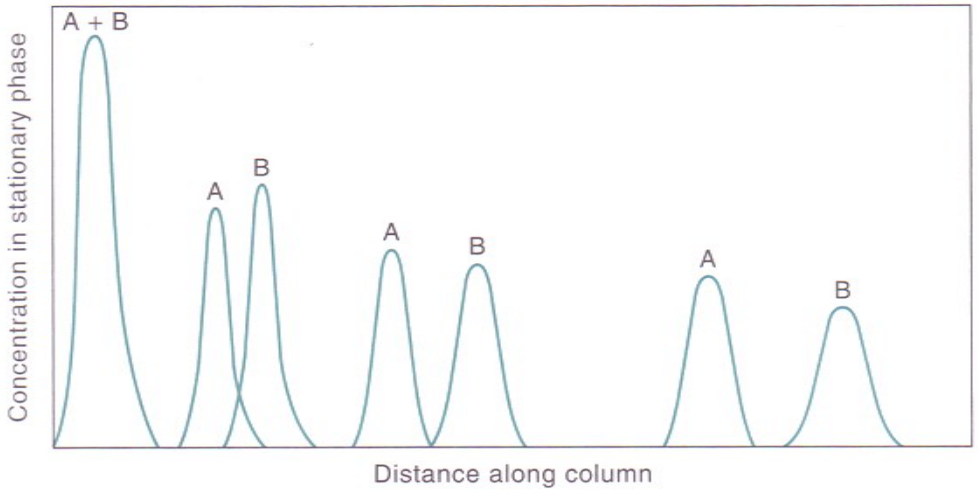
X_m = สารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสเคลื่อนที่

$[X]_s$ = ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสที่อยู่กับที่

$[X]_m$ = ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่อยู่ในเฟสเคลื่อนที่

โดยที่ค่า K_c จะมีความสัมพันธ์กับความเร็วของการเคลื่อนที่ของสารตัวอย่างตามเฟสเคลื่อนที่ในขณะที่ทำการเดเวลลอบ (Development) คือเมื่อค่า K_c เพิ่มจะทำให้ค่าเฉลี่ยของอัตราเร็วในการ

เคลื่อนที่ของสารตัวอย่างลดลง (สารตัวอย่างจะชอบอยู่ที่เฟสที่อยู่กับที่มากกว่า) ซึ่งก็หมายความว่าถ้าสารตัวอย่างมีค่า K_c ต่างกันก็จะทำให้เกิดการแยกออกจากกันได้ การแยกจะแสดงดังรูปที่ 2.38 ซึ่งสาร A ที่ผสมอยู่กับสาร B และถูกแยกออกจากกันเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่ต่างกัน จากรูปที่ 2.38 จะเห็นว่าสาร A มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายสูงกว่าสาร B จึงถูกแยกออกมาทีหลัง [117, 118]



รูปที่ 2.38 สาร A และ B ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายที่ต่างกันจึงทำให้ถูกแยกออกจากกันได้ [117]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.Jedsadapattarakul [119] เตรียมซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงจากแกลบข้าว เพื่อใช้เป็นของแข็งยึดเกาะ (solid support) ของเฟสอยู่กับที่สำหรับคอลัมน์ GC และ HPLC ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 % (w/v) ได้สารละลายโซเดียมเมทาซิลิเกต (Na_2SiO_3) ปรับ pH เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 15 % (v/v) จะได้เจลของซิลิกา นำเจลไปทำให้แห้งด้วยเครื่องพ่นแห้ง จะได้ผงซิลิกาที่สามารถนำมาทำเฟสอยู่กับที่สำหรับคอลัมน์ GC และ HPLC ที่มีราคาถูกว่าราคาตามท้องตลาด

มีศักดิ์ มิลินทวิสมัย และ สีหนาถ ชาญณรงค์ [120] ประยุกต์ใช้หลอดตรวจวัดที่ออกแบบสำหรับวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยในอากาศมาใช้ในการตรวจสอบและวัดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยที่แทรกซึมอยู่ในดินเพื่อหาแนวทางในการป้องกัน แก้ไขและควบคุมการกระจายตัวของสารอินทรีย์ระเหยในดิน 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 % ขีดจำกัดของการตรวจวัด (สามเท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) เท่ากับ 1.24 ppm

Vladimír Pitschmann และคณะ [122] ได้ผลิตหลอดตรวจวัดปริมาณของคลอรีนในอากาศ ซึ่งภายในหลอดตรวจวัดจะบรรจุด้วยซิลิกาที่เคลือบด้วยรีเอเจนท์ตรวจวัด 2 ชนิดคือ 4-aminoantipyrine และ N-(1-naphtyl)ethylenediamine dihydrochloride โดยทำให้รีเอเจนท์ตรวจวัดคงตัวด้วยโซเดียมและไตรเอทิลีนไกลคอล (triethylene glycol) สามารถตรวจวัดคลอรีนในอากาศได้ในช่วงความเข้มข้น 15 – 150 mg/m^3 และเมื่อคลอรีนทำปฏิกิริยากับรีเอเจนท์ตรวจวัดแล้วจะได้สารสีน้ำเงินม่วง

Y. Tanaka และคณะ [123] ศึกษาการตรวจวัดกลิ่นในอากาศโดยใช้หลอดตรวจวัดต่อกับ A4-size optical scanner ทำให้สามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของเมทิลเมอแคพแทน (methyl mercaptan) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) และโพรพานอลดีไฮด์ (propionaldehyde) ได้เท่ากับ 29, 19 และ 46 ppb ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าการนำหลอดตรวจวัดมาต่อกับ 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 กรดอะซีติก 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 และพบว่าการตรวจวัดด้วยหลอดตรวจวัดสามารถหาปริมาณของเบนซีนกับไวนิลคลอไรด์ได้ง่าย เร็ว และประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าการตรวจวัดด้วยวิธีอื่นอย่างมาก

J. G. March, M. Gual และ B. M. Simonet [127] ตรวจวัดปริมาณของคลอรีนตกค้างในน้ำคลำด้วยออโธโทลิดีน โดยวิธี batch method และ sequential injection method พบว่าการเกิดปฏิกิริยาของออโธโทลิดีนกับคลอรีนคงเหลือในน้ำคลำจะเกิดช้าเนื่องจากผลของ matrix จากการศึกษาพบว่าวิธี batch method และ sequential injection method สามารถหาช่วงความเป็นเส้นตรงของวิธี (linear range of the methods) ได้เท่ากับ 0–3.0 และ 0–5.0 $mgCl_2$/L และสามารถตรวจวัดสารได้ความเข้มข้นน้อยที่สุด (limit of quantification) เท่ากับ 0.2 และ 0.5 $mgCl_2$ /L ตามลำดับ

Aki Sakai และคณะ [128] วิเคราะห์หาปริมาณของคลอรีนตกค้างในน้ำประปาด้วยวิธี FIA (flow injection analysis) โดยใช้ Pb(II) ion-selective electrode (ISE) ซึ่งภายในระบบประกอบด้วย millivolt meter, aperistaltic 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 ของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ตรวจวัดที่ช่วงความยาวคลื่น 430 nm และใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมหลอดดิวทีเรียม (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) ในสภาวะที่เป็นกรด และได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสีเหลือง แล้วจึงตรวจวัดด้วยวิธี diffuse reflectance spectroscopy ได้ค่าความเป็นเส้นตรงเท่ากับ 5–150 μg

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

ด้วย Gas diffusion sequential injection system โดยใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานไอโดเมทริกไทเทรชัน สามารถหาความเข้มข้นของคลอรีนอิสระได้เท่ากับ 0.6 mg ClO^-/L

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

Fumihiro Kodera และคณะ [133] ตรวจวัดปริมาณคลอรีนอิสระโดยใช้เทคนิคอะโนดิกโวลแทมเมทรี (anodic voltammetry) ด้วยอิเล็กโทรดแพททินัม อิเล็กโทรดทอง และอิเล็กโทรดแกลสซี-คาร์บอน(glassy carbon electrodes) เปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานวิธีมาตรฐานไอโดเมทริกไทเทรชัน 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 μM/L เมื่อความเข้มข้นสูงกว่า 100 μM/L ค่าการดูดกลืนจะลดลง แต่ถ้าลดความยาวคลื่นให้เป็น 324 nm จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงขึ้น ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนความยาวคลื่นให้อยู่ในช่วง 200–600 nm จะสามารถวัดปริมาณคลอรีนอิสระได้ความเข้มข้นถึง 200 μM/L

Karin Carlsson และคณะ [135] หาปริมาณของคลอรีนอิสระและคลอรีนคงเหลือในน้ำด้วย N,N′ - diethyl -p- phenylenediamine (DPD) พัฒนาวิธีใหม่ขึ้นมาโดยอาศัยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer) เพื่อควบคุม pH โดย N,N′ - diethyl -p- phenylenediamine จะเป็นรีเอเจนท์ที่ทำปฏิกิริยากับคลอรีนอิสระและคลอรีนคงเหลือจะได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสี และตรวจวัดด้วยระบบ FIA สารตัวอย่าง รีเอเจนท์ และสารละลายบัฟเฟอร์จะถูกนำเข้าสู่ระบบด้วยปั๊ม 25 μL ต่อ 1 ครั้ง ด้วยอัตราการไหล 90 μL/นาที และใช้เวลาในการวัดเพียง 2 นาที และพบว่าคลอรีน คลอรามีนมีค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดที่น้อยที่สุด (limit of detection) เท่ากับ 3.2 μM และ 1.9 μM ตามลำดับ