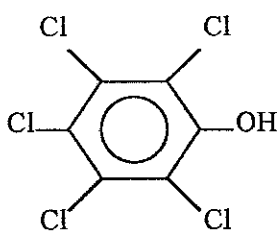


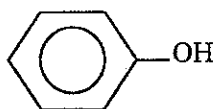
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

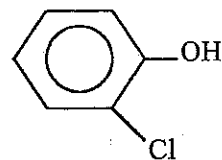
สารประกอบฟีนอล เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่มีหมู่ $-OH$ เป็นหมู่แสดงสมบัติเฉพาะ ซึ่งหมู่ $-OH$ จับโดยตรงกับคาร์บอนในวงแหวนเบนซีน มีสูตรพื้นฐานทางเคมีคือ C_6H_5OH ฟีนอลและอนุพันธ์บางชนิดแสดงดังภาพ 1



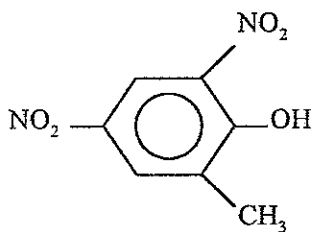
Pentachlorophenol ($pK_a = 4.50$)



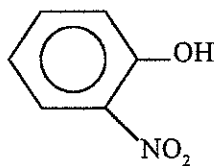
Phenol ($pK_a = 9.89$)



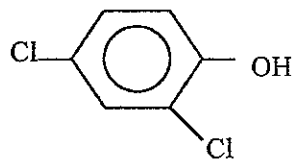
2-chlorophenol ($pK_a = 8.48$)



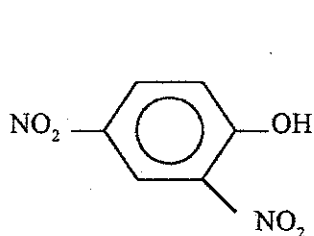
2-methyl-4,6-dinitrophenol ($pK_a = 4.70$)



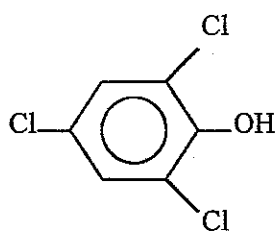
2-nitrophenol ($pK_a = 7.23$)



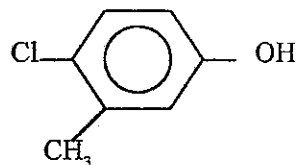
2,4-dichlorophenol ($pK_a = 7.85$)



2,4-dinitrophenol ($pK_a = 4.00$)



2,4,6-trichlorophenol ($pK_a = 7.42$)



4-chloro-3-methylphenol ($pK_a = 9.54$)

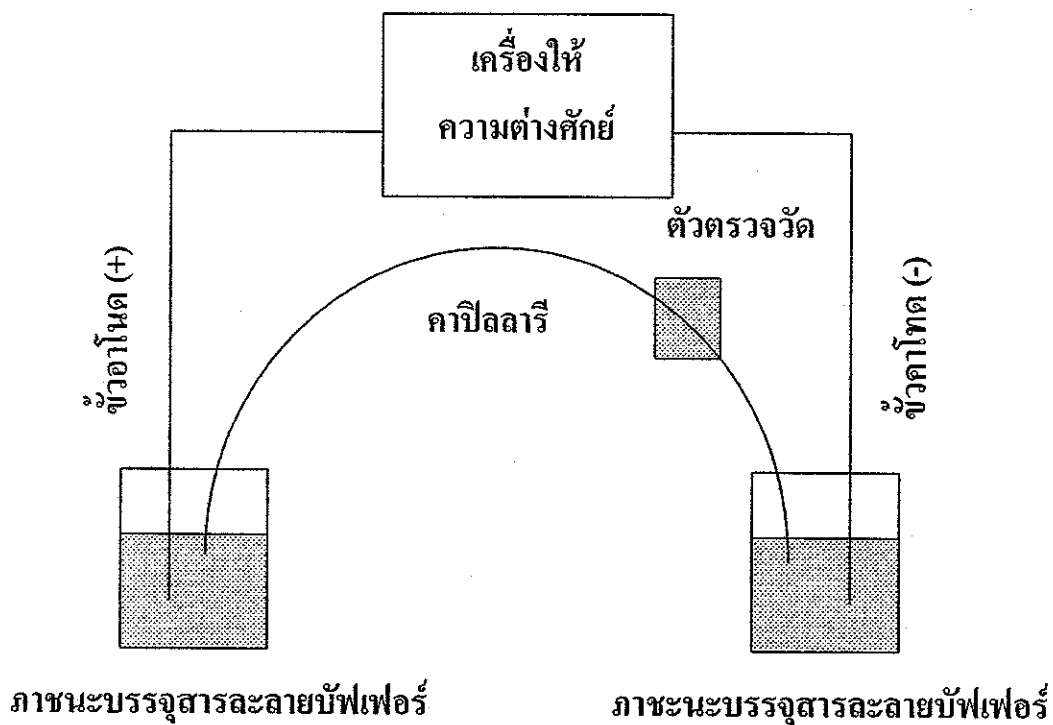


4-nitrophenol ($pK_a = 7.15$)

ภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างและค่า pK_a ของสารกลุ่มฟีนอล

ทฤษฎีเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส

คาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส (Capillary Electrophoresis, CE) เป็นเทคนิคการแยกที่อาศัยความแตกต่างของการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า (Jorgenson, & Lukacs, 1981) เครื่องคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส (แสดงดังภาพ 2) ประกอบด้วย 2 อิเล็กโทรด (electrode) คือขั้วแอโนด (anode) ซึ่งเป็นขั้วบวกและขั้วคาโทด (cathode) ซึ่งเป็นขั้วลบ เครื่องให้ความต่างศักย์ (high voltage power supply) คาปิลลารี (capillary) ภาชนะบรรจุสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer reservoir) และตัวตรวจวัด (detector) ซึ่งวางอยู่ทางด้านขั้วคาโทด หลอดคาปิลลารีโดยทั่วไปทำจากฟิวส์ซิลิกา (fused silica) ปลายเปิดทั้งสองข้าง ภายในบรรจุสารละลายบัฟเฟอร์และปลายทั้งสองข้างจุ่มอยู่ในภาชนะที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์ เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองทำให้เกิดอิเล็กโตรออสโมติกโฟล (electroosmotic flow, EOF) และอิเล็กโตรโฟรีติกโมบิลิตี (electrophoretic mobility, μ_{ep}) ซึ่งทำให้สารเคลื่อนที่ภายในคาปิลลารี ไอออนที่มีประจุบวกเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุและอิเล็กโตรออสโมติกโฟล โมเลกุลที่เป็นกลางเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอิเล็กโตรออสโมติกโฟลและไอออนที่มีประจุลบเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดด้วยอิเล็กโตรออสโมติกโฟล



ภาพที่ 2 อุปกรณ์พื้นฐานของเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส (Weinberger, 1993)

หลักการแยกพื้นฐานของเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส

เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่คาปิลลารี ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และการแยกของสาร การแยกเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อสารเหล่านั้นมีความเร็วในการเคลื่อนที่ภายในหลอดคาปิลลารีไม่เท่ากัน โดยแรงในการเคลื่อนที่ซึ่งมีผลต่อการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของสารในสนามไฟฟ้ามีดังนี้

1. อิเล็กโทรโฟเรติกโมบิลิตี (electrophoretic mobility, μ_{ep}) เป็นการเคลื่อนที่ของสารอันเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างไอออนกับขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงกันข้าม โดยแรงนี้ขึ้นอยู่กับประจุและขนาดของโมเลกุล โมเลกุลที่มีประจุสูงมีการเคลื่อนที่เร็วกว่าโมเลกุลที่มีประจุต่ำและโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ช้ากว่าโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก

อิเล็กโทรโฟเรติกโมบิลิตี สามารถหาได้จากสมการที่ 1 (Weinberger, 1993, p. 19)

$$\mu_{ep} = \frac{L_d / t_m}{V / L_t} \quad (1)$$

เมื่อ

μ_{ep} คือ อิเล็กโทรโฟเรติกโมบิลิตี ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)

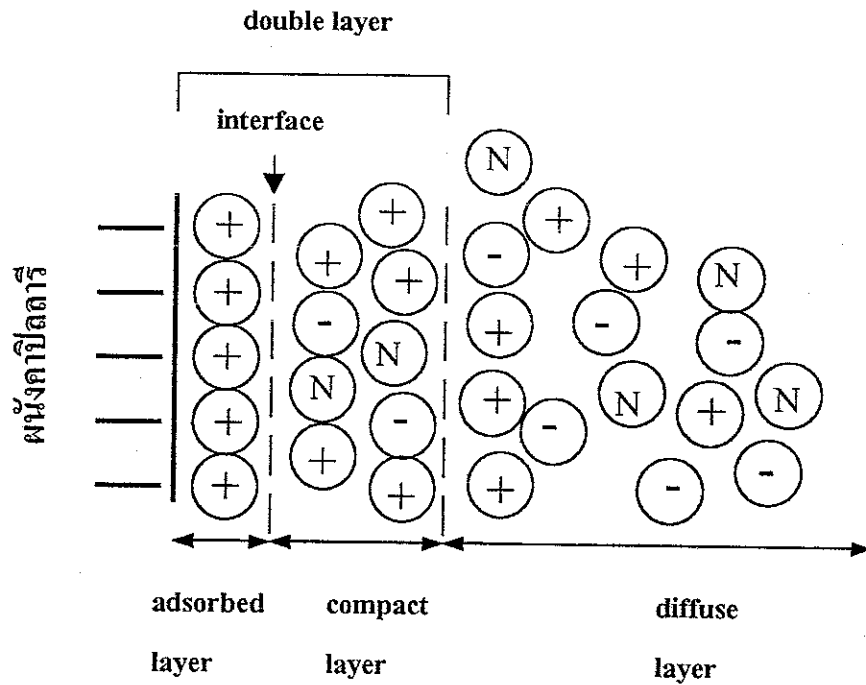
L_d คือ ความยาวของคาปิลลารี (cm)

L_t คือ ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก (cm)

t_m คือ ไมเกรชันไทม์ (sec)

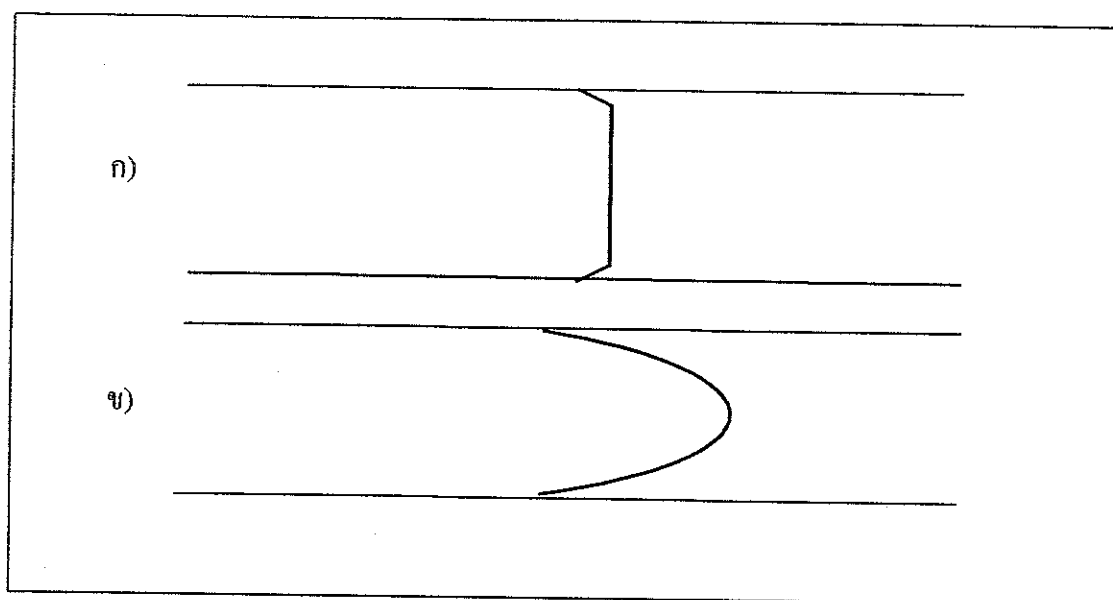
V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (V)

2. อิเล็กโทรออสโมติกโฟล (electroosmotic flow, EOF) เป็นการเคลื่อนที่ของประจุบวกที่เกิดจากการแตกตัวของสารละลายบัฟเฟอร์ เนื่องจากคาปิลลารีทำมาจากฟิวส์ซิลิกาซึ่งมีหมู่ซิลานอล ($\text{Si}-\text{OH}$) เมื่อแตกตัวทำให้ผนังภายในของคาปิลลารีมีประจุลบ ($\text{Si}-\text{O}^-$) เกิดเป็นโครงสร้างดับเบิลเลเยอร์ (double layer) ขึ้นที่บริเวณผนังของคาปิลลารี ไอออนจะเกิดการกระจายตัวดังภาพ 3 ไอออนที่มีประจุลบจะถูกผลักเนื่องมาจากประจุลบที่บริเวณผนังของคาปิลลารี ไอออนที่มีประจุบวกจะถูกดึงดูดเข้ามาบริเวณผนังของคาปิลลารี ซึ่งไอออนบริเวณนี้จะไม่มีการเคลื่อนที่เรียกบริเวณนี้ว่า adsorbed layer ถัดจากบริเวณผนังของคาปิลลารีออกไปเป็นบริเวณที่เรียกว่า compact layer เนื่องจากบริเวณนี้แรงดึงดูดระหว่างประจุที่ผนังของคาปิลลารีมีค่าลดลงทำให้บริเวณนี้มีการกระจายตัวของประจุลบ ถัดจากบริเวณนี้ออกมาเป็นบริเวณที่เรียกว่า diffuse layer ซึ่งบริเวณนี้สารสามารถเคลื่อนที่ได้



ภาพที่ 3 โครงสร้างดับเบิลเลเยอร์ (Weinberger, 1993)

ลักษณะการเคลื่อนที่ภายในคาปิลลารีมีลักษณะเป็น flat profile ดังภาพ 4 (ก) ทำให้เกิดการกระจายตัวของสารน้อย ทำให้มีประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น ซึ่งต่างจากการเคลื่อนที่ในเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีและเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟี ซึ่งการเคลื่อนที่เป็นแบบ laminar ดังภาพ 4 (ข)



ภาพที่ 4 ก) ลักษณะการเคลื่อนที่แบบ electroosmotic flow ในคาปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส

ข) ลักษณะการเคลื่อนที่แบบ laminar ในแก๊สโครมาโทกราฟีและไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์
ลิกวิดโครมาโทกราฟี

อิเล็กโทรออสโมติกโมบิลิตีของสารละลายตัวอย่าง สามารถหาได้จากสมการที่ 2 (Rose, & Jorgenson, 1988)

$$\mu_{eof} = \frac{V_{eof}}{V_i} L \quad (2)$$

เมื่อ

μ_{eof} คือ อิเล็กโทรออสโมติกโมบิลิตีของสารละลายตัวอย่าง ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)

V_{eof} คือ ความเร็วอิเล็กโทรออสโมติกของสารละลายตัวอย่าง (cm sec^{-1})

V_i คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (V)

L คือ ความยาวของคาปิลลารี (cm)

นอกจากนี้อิเล็กโทรออสโมติกโมบิลิตียังขึ้นอยู่กับความหนืดและความเข้มข้นของ
สารละลายบัฟเฟอร์ดังสมการที่ 3 - 5

$$\mu_{eof} = \frac{\epsilon \zeta}{\eta} \quad (3)$$

ζ ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณดับเบิลเลเยอร์ (zeta potential) สามารถหาได้จากสมการที่ 4
(Tsuda, Nomura, & Nakagawa, 1982 cited in Weinberger, 1993, p. 24)

$$\zeta = \frac{4\pi\delta e}{\epsilon} \quad (4)$$

δ ความหนาของดับเบิลเลเยอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 11

$$\delta = [3 \times 10^7 / Z/C^{1/2}]^1 \quad (5)$$

เมื่อ

μ_{eof} คือ อิเล็กโทรออสโมติกโมบิลิตี ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)

ζ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณดับเบิลเลเยอร์ (V)

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารละลายบัฟเฟอร์

η คือ ความหนืดของสารละลายบัฟเฟอร์ ($\text{g cm}^{-1} \text{sec}^{-1}$)

e คือ ประจุทั้งหมดในสารละลายต่อหน่วยพื้นที่

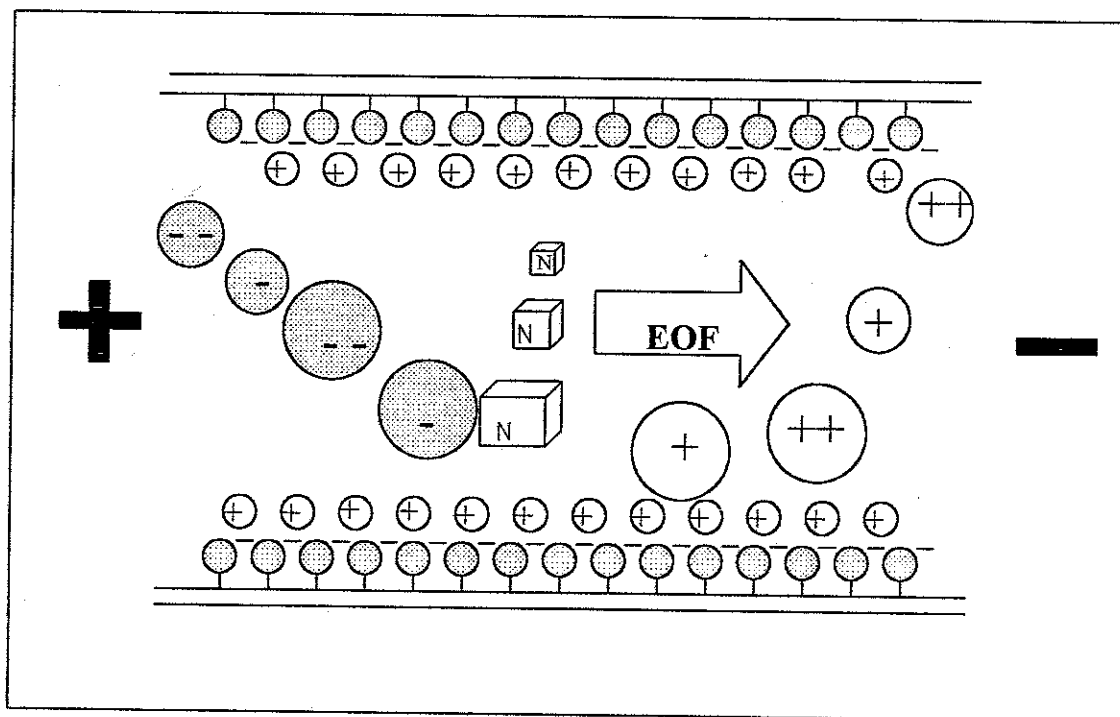
δ คือ ความหนาของดับเบิลเลเยอร์

Z คือ จำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอน

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ (mole cm^{-3})

การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของโมเลกุล เป็นผลรวมของการเคลื่อนที่ทั้งสองแบบคืออิเล็กโตรออสโมติกโฟลและอิเล็กโตรโฟเรติกโมบิลิตี้ และการตรวจวัดเกิดขึ้นเมื่อสารละลายตัวอย่างเคลื่อนที่ผ่านตัวตรวจวัดซึ่งอยู่ที่ปลายคาโทด โดยทั่วไปอิเล็กโตรออสโมติกโฟลมีค่ามากกว่าอิเล็กโตรโฟเรติกโมบิลิตี้ ทำให้ทั้งโมเลกุลที่มีประจุบวกและโมเลกุลที่มีประจุลบเคลื่อนที่สู่คาโทดซึ่งมีตัวตรวจวัด โมเลกุลที่มีประจุบวกจะมีแรงดึงดูดให้เคลื่อนที่เข้าสู่คาโทดรวมกับอิเล็กโตรออสโมติกโฟล ซึ่งเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วคาโทดเช่นกัน ทำให้ประจุบวกเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วที่สุด จากนั้นจึงเป็นโมเลกุลที่เป็นกลางซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอิเล็กโตรออสโมติกโฟลเท่านั้น แล้วจึงเป็นโมเลกุลที่มีประจุลบ ซึ่งเคลื่อนที่ด้วยอิเล็กโตรโฟเรติกโมบิลิตี้ในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กโตรออสโมติกโฟล ซึ่งถูกผลักโดยขั้วคาโทด ทำให้เคลื่อนที่ออกมาช้าที่สุด

ดังภาพ 5



ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่มีประจุบวก, ประจุลบและโมเลกุลที่เป็นกลาง
ในคาปิลลารีภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า

วิธีการนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารี

วิธีการนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารี มี 3 วิธี คือ

1. การนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีโดยใช้ความดัน (hydrodynamic injection) ดังภาพ 6 (ก) เป็นการนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีโดยอาศัยความแตกต่างของความดัน ทำโดยการจุ่มปลายด้านหนึ่งของคาปิลลารีลงในภาชนะบรรจุสารละลายตัวอย่างและอีกด้านหนึ่งจุ่มอยู่ในภาชนะที่บรรจุสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นให้ความดันจนสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีในปริมาณที่ต้องการ จึงหยุดให้ความดัน ปริมาตรของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารีขึ้นอยู่กับ เวลาที่ใช้ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของคาปิลลารี ความหนืดของสารละลายบัฟเฟอร์และความดันที่ใช้

ปริมาตรของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารี สามารถหาได้จากสมการที่ 6 (Weinberger, 1993, p. 200)

$$V_t = \frac{\Delta P D^4 \pi}{128 \eta L} \quad (6)$$

เมื่อ

V_t คือ ปริมาตรของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารีต่อเวลา ($\text{cm}^3 \text{sec}^{-1}$)

ΔP คือ ความดันที่แตกต่างระหว่างคาปิลลารี (Pa)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายในของคาปิลลารี (cm)

η คือ ความหนืดของสารละลายบัฟเฟอร์ (Pa sec)

L คือ ความยาวของคาปิลลารี (cm)

2. การนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีโดยใช้ความแตกต่างของระดับ (hydrostatic injection) ดังภาพ 6 (ข) ทำโดยการจุ่มปลายด้านหนึ่งของคาปิลลารีลงในภาชนะบรรจุสารละลายตัวอย่างและอีกด้านหนึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นยกภาชนะด้านที่มีสารละลายตัวอย่างขึ้น เพื่อให้ปลายคาปิลลารีที่จุ่มอยู่ในสารละลายตัวอย่างอยู่สูงกว่าปลายที่มีเครื่องตรวจวัด อาศัยความแตกต่างของระดับความสูงทำให้สารตัวอย่างไหลเข้าคาปิลลารีด้วยแรงดึงดูดของโลก ปริมาณสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารี ขึ้นอยู่กับเวลาที่คาปิลลารีจุ่มอยู่ในสารละลายตัวอย่างและความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างปลายทั้งสองของคาปิลลารี

ปริมาณของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารี สามารถหาได้จากสมการที่ 7 (Jandik, & Boon, 1993, p. 84)

$$Q = \frac{\rho g \pi r^4 \Delta h t}{8 \eta L} C \quad (7)$$

เมื่อ

Q คือ ปริมาณของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารี (mole)

ρ คือ ความหนาแน่นของสารละลายตัวอย่าง (g cm^{-3})

Δh คือ ความแตกต่างของระดับความสูงระหว่างปลายทั้งสองของคาปิลลารี (cm)

g คือ ค่าคงที่แรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 cm sec^{-2})

r คือ รัศมีภายในของคาปิลลารี (cm)

η คือ ความหนืดของสารละลายบัฟเฟอร์ ($\text{g cm}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)

L คือ ความยาวของคาปิลลารี (cm)

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง (mole cm^{-3})

t คือ เวลาที่คาปิลลารีจุ่มอยู่ในสารละลายตัวอย่าง (sec)

3. การนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีโดยใช้ศักย์ไฟฟ้า (electrokinetic injection)

ดังภาพ 6 (ค) ทำโดยการจุ่มปลายด้านหนึ่งของคาปิลลารีลงในภาชนะบรรจุสารละลายตัวอย่าง และปลายอีกด้านหนึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ จากนั้นให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็นระยะเวลาดังนั้น ทำให้สารตัวอย่างเคลื่อนที่เข้าคาปิลลารี หลังจากสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีให้ปลายคาปิลลารีทั้งสองจุ่มอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์แล้วให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วทั้งสอง ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนในสารตัวอย่างในคาปิลลารีไปด้านที่มีตัวตรวจวัด ปริมาณสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารีขึ้นอยู่กับเวลา ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้และอิเล็กโทรโฟรีติกโมบิลิตีของไอออนที่ต้องการวิเคราะห์

ปริมาณของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารี สามารถหาได้จากสมการที่ 8 (Rose, & Jorgenson, 1988)

$$Q = \frac{(\mu_{ep} + \mu_{eof}) \pi r^2 V t}{L} C \quad (8)$$

เมื่อ

Q คือ ปริมาณของสารตัวอย่างที่เข้าคาปิลลารี (mole)

μ_{ep} คือ อิเลคโตรโฟเรติกโมบิลิตี ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)

μ_{eof} คือ อิเลคโตรออสโมติกโมบิลิตี ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{sec}^{-1}$)

r คือ รัศมีภายในของคาปิลลารี (cm)

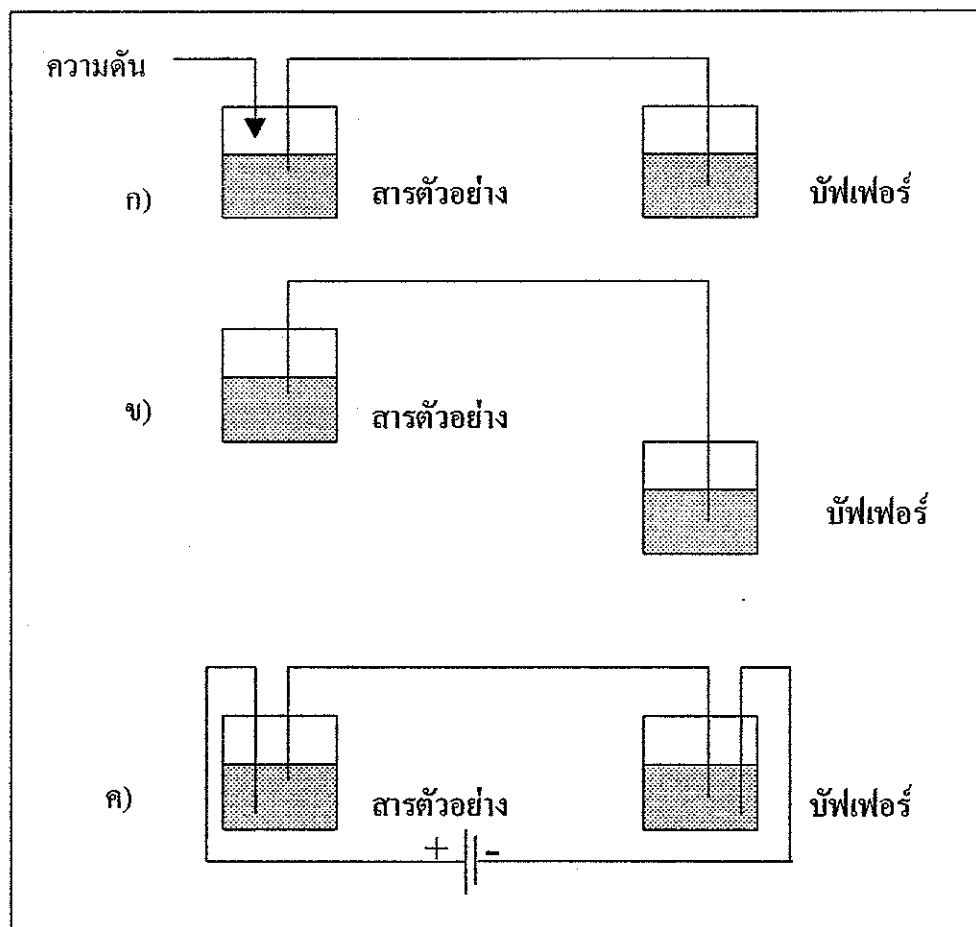
V คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ (V)

L คือ ความยาวของคาปิลลารี (cm)

C คือ ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง (mole cm^{-3})

t คือ เวลาในการนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารี (sec)

เทคนิค Stacking เป็นเทคนิคการนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีนอกเหนือจาก 3 วิธีข้างต้น วัตถุประสงค์ของเทคนิคนี้ เพื่อต้องการเพิ่มสภาพไวให้วิธีการวิเคราะห์ ทำโดยละลายสารตัวอย่างในสารละลายบัฟเฟอร์ที่เจือจางของสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการแยก (running buffer) และนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารี เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในคาปิลลารี เนื่องจากสารตัวอย่างละลายอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่เจือจางจึงมีความต้านทานสูง ความแรงของสนามไฟฟ้าบริเวณสารตัวอย่างจะสูงกว่าในสารละลายบัฟเฟอร์ เป็นเหตุให้สารตัวอย่างเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วไปยังบริเวณรอยต่อระหว่างสารละลายบัฟเฟอร์และเคลื่อนที่ต่อไปยังตัวตรวจวัด การที่สารตัวอย่างเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วภายในคาปิลลารีมีผลทำให้ลักษณะของพีคที่ได้มีรูปร่างสมมาตรความกว้างฐานพีคแคบ ทำให้สามารถเพิ่มสภาพไวให้กับวิธีการวิเคราะห์



ภาพที่ 6 การนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารี ก) โดยใช้ความดัน
 ข) โดยใช้ความแตกต่างของระดับ
 ค) โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลได้มีผู้ทำการศึกษาดังนี้
 ภายทอนด์ และแพธัก (Gaitonde, & Pathak, 1990) วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลและคลอโรฟีนอล 7 ชนิด ในน้ำเสียจากโรงงาน Dharansu Nirarhu Chemical ในประเทศอินเดีย โดยเทคนิคคาปิลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดแอมพิโรเมตรี ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลารี 65 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลารีที่ใช้ในการแยก 35 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 ไมโครเมตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมไคไฮโดรเจนฟอสเฟต 45 มิลลิโมลต่อลิตร pH 8.0 ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 20–25 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 24 นาที ชีดจำกัดของการตรวจวัด 1 ไมโครกรัมต่อลิตร เตรียมตัวอย่างโดยใช้ liquid-liquid extraction สกัดตัวอย่างน้ำเสีย 5 มิลลิลิตร ด้วย 5 มิลลิลิตร ของคลอโรฟอร์ม : ไดเอทิลอีเธอร์ ในอัตราส่วน 50 : 50 (ปริมาตรต่อปริมาตร) และพบว่าการแยกสารโดยวิธีนี้ให้สภาพไวและความเฉพาะดีกว่า การวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟีและแก๊สโครมาโทกราฟี โดยที่ไม่ต้องทำอนุพันธ์

กาวด์ซิก, กาวด์ซิก และเซอร์ชินสกา-บิล (Gawdzik, Gawdzik, & Gzersinska-Bil, 1990) สกัดฟีนอล 11 ชนิดจากน้ำโดยใช้ solid-phase extraction (SPE) วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร โดยศึกษาประสิทธิภาพของดูดซับ 2 ชนิดคือ 1,4-di(methacryloyloxymethyl)-naphthalene-divinylbenzene copolymer (1,4-DMN-DVB) ขนาด 0.04 – 0.05 มิลลิเมตร กับ Amberlite XAD-4 ขนาด 0.04 – 0.05 มิลลิเมตร โดยการหาล้อยละการกลับคืนพบว่า Amberlite XAD-4 ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าเนื่องมาจากว่ามีพื้นที่ผิวมากกว่า 1,4-DMN-DVB ประมาณ 3 เท่า ร้อยละการกลับคืนของ Amerlite XAD-4 ที่ได้ในช่วง 79.8 – 100.6

กอนนอร์ด และคอลเลต (Gonnord, & Collet, 1993) ศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการแยกคลอโรฟีนอล 13 ชนิด โดยเทคนิคคาปิลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดยูวี (UV) ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 214 นาโนเมตร ใช้สภาวะคือความยาวของคาปิลารี 57 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลารีที่ใช้ในการแยก 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ pH และความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ และศักย์ไฟฟ้า สภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมฟอสเฟต 50 มิลลิโมลต่อลิตร pH 6.9 ศักย์ไฟฟ้า 18 กิโลโวลต์ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 16 นาที ช่วงความเข้มข้นที่ให้กราฟเป็นเส้นตรง 0 – 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ชีดจำกัดของการตรวจวัด 60 – 340 ไมโครกรัมต่อลิตร

มาคุช, กาชาด และคามินสกี (Makuch, Gazad, & Kaminski, 1993) สกัดฟีนอลและคลอโรฟีนอลจากน้ำ วิเคราะห์โดยเทคนิคไฮเพอร์ฟอร์แมนซ์ลิกวิดโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร โดยศึกษาการเตรียมตัวอย่างแบบ liquid-liquid - extraction และ solid-phase extraction โดยเปรียบเทียบตัวดูดซับ 5 ชนิด คือ Amberlite XAD-2 , Amberlite XAD-4, Octadecyl sil100, Tenax และ Polyspher RP-18 พบว่าการเตรียมตัวอย่างแบบ liquid-liquid extraction ให้ร้อยละการกักเก็บต่ำเป็นผลเนื่องมาสารตัวอย่างสูญหายในขั้นตอนของการกลั่นและการลดปริมาตรของตัวทำละลาย การเตรียมตัวอย่างแบบ solid-phase extraction ทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับโดยการหาร้อยละการกักเก็บพบว่า Polyspher RP-18 ให้ร้อยละการกักเก็บสูงสุดคืออยู่ในช่วง 99 – 105

เซา และหวัง (Chao, & Whang, 1994) ศึกษาการแยกฟีนอล 11 ชนิด โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดฟลูออโรเมตรี โดยใช้ความยาวคลื่นกระตุ้น 488 นาโนเมตรและตรวจวัดที่ 520 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 50 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 45 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 ไมโครเมตร สารละลายบัฟเฟอร์ประกอบด้วยโซเดียมบอเรต 15 มิลลิโมลต่อลิตรกับ fluorescein 1 มิลลิโมลต่อลิตร pH 9.9 ศักย์ไฟฟ้า 9 กิโลโวลต์ สามารถแยกสารประกอบฟีนอลได้โดยใช้เวลา 14 นาที ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviation, RSD) ของค่าความสูงพีคอยู่ในช่วง 2.7 – 6.3 % ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าพื้นที่พีคอยู่ในช่วง 4.7 – 9.2 % ช่วงการเป็นเส้นตรง 10^{-6} – 10^{-7} โมลต่อลิตร ขีดจำกัดของการตรวจวัด 0.01 – 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร

ลิน, ลิน และเฉียว (Lin, Lin, & Chiou, 1995) ศึกษาการแยกไอโซเมอร์ของไดคลอโรฟีนอล 6 ชนิด โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 44 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 37 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตรและ 50 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า อัตราส่วนของฟอสเฟตและบอเรตในสารละลายบัฟเฟอร์ pH และความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ พบว่าถ้าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นด้วย ศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการทดลองนี้ใช้ศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์สำหรับคาปิลลารีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตรและใช้ศักย์ไฟฟ้า 17 กิโลโวลต์ สำหรับคาปิลลารีที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 ไมโครเมตร เพื่อที่จะควบคุมไม่ให้ค่ากระแสที่ได้เกิน 100 ไมโครแอมแปร์ จะได้ไม่เกิด Joule heating พบว่าไมเกรชันไทม์

ของไดคลอโรฟีนอลเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มอัตราส่วนของฟอสเฟตในสารละลายบัฟเฟอร์และเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายบัฟเฟอร์ อิเล็กโทรดโพรบลิต์เพิ่มขึ้นถ้าเพิ่ม pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ สภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือสารละลายบัฟเฟอร์ประกอบด้วยฟอสเฟต 50 มิลลิโมลต่อลิตร กับบอเรต 10 มิลลิโมลต่อลิตร pH 7.7

ลิ และล็อก (Li, & Locke, 1995) ทำการแยกฟีนอล 11 ชนิด โดยเทคนิคคาปิลลารี อิเล็กโทรโพรบลิต์ ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 100 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 65 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือสารละลายบัฟเฟอร์ประกอบด้วยไตรโซเดียมฟอสเฟต 10 มิลลิโมลต่อลิตรกับโซเดียมบอเรต 10 มิลลิโมลต่อลิตร pH 9.8 ศักย์ไฟฟ้า 22.5 กิโลโวลต์ ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 15 นาที ช่วงการเป็นเส้นตรง 5-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดของการตรวจวัดอยู่ในช่วง 0.3-0.6 มิลลิกรัมต่อลิตร

โพคุรัล, คาลัล, มาร์เช และบอร์รัล (Pocurull, Calull, Marce, & Borrull, 1996) ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอล 11 ชนิดจากน้ำ ที่ระดับความเข้มข้นไมโครกรัมต่อลิตร (ppb) วิเคราะห์โดยใช้ลิควิดโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอาร์เรย์ ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 210 และ 350 นาโนเมตร โดยศึกษาการเตรียมตัวอย่างแบบ solid-phase extraction (SPE) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับ 2 ชนิดคือ carbon และ high cross-linked styrene divinylbenzene พบว่า high cross-linked styrene divinylbenzene ให้ร้อยละการกลับคืนสูงกว่า carbon และได้หาค่าร้อยละการกลับคืนของตัวอย่างน้ำจากแม่น้ำ Ebro ของประเทศสเปน โดยการนำตัวอย่างน้ำปริมาตร 500 มิลลิลิตร มาเติมสารละลายมาตรฐานกลุ่มฟีนอลความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อลิตร พบว่าให้ร้อยละการกลับคืนมากกว่า 90 RSD น้อยกว่า 10 ขีดจำกัดของการตรวจวัด 65-100 นาโนกรัมต่อลิตร

เทอนส, เมฆูโต และซีลา (Turnes, Mejuto, & Cela, 1996) วิเคราะห์ปริมาณเพนตะคลอโรฟีนอลในน้ำ โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโทรโพรบลิต์ตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอาร์เรย์ (diode-array detector) ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร ความยาวอ้างอิงที่ 450 และ 480 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือใช้คาปิลลารีเคลือบด้วย polyamide ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 65 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 ไมโครเมตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมบอเรต 40 มิลลิโมลต่อลิตร pH 10.0 ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำการเพิ่มสภาพไวของวิธีการวิเคราะห์โดยการขยายสัญญาณของช่องทางเดินแสงที่ยาวขึ้นตัวตรวจวัด (extend light path) และนำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีแบบ stacking ช่วงความเข้มข้นของการเป็น

เส้นตรง 5-40 ไมโครกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (signal to noise, S/N = 10) 1.9 ไมโครกรัมต่อลิตร มีการเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์โดยใช้วิธี solid- phase extraction (SPE) โดยใช้ 0.25 กรัม graphite carbon black (GCB) เป็นตัวดูดซับ ะด้วย 3 มิลลิลิตรของสารละลายที่ประกอบด้วยเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 10 มิลลิโมลต่อลิตร ในเมทิลีนคลอไรด์ ต่อเมทานอลในอัตราส่วน 90:10 (ปริมาตรต่อปริมาตร) และตามด้วย 3 มิลลิลิตรของน้ำ ได้ร้อยละการกลับคืน 95.8 ± 2.7 ($n=5$)

มาเมน, มาเซลล์, กิลเล็ท, ดิสนาร์ และโมริน (Maman, Marseille, Guillet, Disnar, & Morin, 1996) ศึกษาการแยกสารฟีนอล อัลดีไฮด์ คีโตนและกรด โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 214 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 57 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 ไมโครเมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต-บอเรต 55 มิลลิโมลต่อลิตร ในอะซิโตนไตรีนอน้ำในอัตราส่วน 8.5:91.5 (ปริมาตรต่อปริมาตร) pH 9.1 ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่า 15 นาที และพบว่าถ้าทำการปรับสภาพผิวของคาปิลลารีก่อนการวิเคราะห์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร 2 นาที ตามด้วยน้ำกลั่น 2 นาทีและสุดท้ายสารละลายบัฟเฟอร์ 2 นาที ทำให้ค่าไมเกรชันไทม์ได้ผลซ้ำกันดี ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของไมเกรชันไทม์อยู่ในช่วง 0.23 – 0.76 % ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าพื้นที่พีค 0.8 – 0.45 %

โรดริเกซ, เทอเนส, บอลเลน, เมฆูโต และซีลา (Rodriguez, Turnes, Bollain, Mejuto, & Cela, 1997) ศึกษาการแยกและหาปริมาณฟีนอลในน้ำ โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดไดโอดอาร์เรย์ ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 210 230 และ 370 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือคาปิลลารีเคลือบด้วย polyamide ความยาวของคาปิลลารี 70 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 62 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 50 ไมโครเมตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมบอเรต 40 มิลลิโมลต่อลิตร pH 9.8 ศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 16 นาที ปรับปรุงวิธีการวิเคราะห์โดยการเตรียมตัวอย่างแบบ solid- phase extraction (SPE) โดยใช้ cross-linked polystyrene เป็นตัวดูดซับ ะด้วยเมทานอล ได้ร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 75.8 – 105.6 ความเข้มข้นช่วงการเป็นเส้นตรง 20 – 700 ไมโครกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ปริมาณ (S/N = 10) ที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตร 0.01- 0.16 ไมโครกรัมต่อลิตร ความยาวคลื่น 230 นาโนเมตร 0.01- 0.21 ไมโครกรัมต่อลิตร และความยาวคลื่น 370 นาโนเมตร 0.01- 0.02 ไมโครกรัมต่อลิตร

ฮิลมิ, ลูอง และเง็น (Hilmi, Luong, & Ngnyen, 1997) แยกคลอโรฟีนอล โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดแอมพิโรเมตรี ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 70 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 ไมโครเมตร ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ พบว่าการเติม sulfobutylether- β -cyclodextrin ในสารละลายบัฟเฟอร์ทำให้การแยกดีขึ้น แต่ไม่เกรชันใหม่เพิ่มขึ้นและความสามารถในการตรวจวัดลดลง สารละลายบัฟเฟอร์ผสมที่ประกอบด้วยฟอสเฟตและบอเรต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกได้ดีกว่าการเติม sulfobutylether- β -cyclodextrin พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือ สารละลายบัฟเฟอร์ประกอบด้วยฟอสเฟต 25 มิลลิโมลต่อลิตรกับบอเรต 25 มิลลิโมลต่อลิตร pH 8.0 ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 19 นาที ขีดจำกัดของการตรวจวัด 100 นาโนโมลต่อลิตร

บรูจิงวูท, แชน, ป็อบเป้ และค็อก (Bruijnsvoort, Sanghi, Poppe, & Kok, 1997) หาปริมาณคลอโรฟีนอล โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส เปรียบเทียบตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 210 นาโนเมตรกับตัวตรวจวัดชนิดแอมพิโรเมตรี ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 85 เซนติเมตร ความยาวคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 65 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตร พบว่าตัวตรวจวัดชนิดแอมพิโรเมตรีให้ขีดจำกัดของการตรวจวัด 5–36 ไมโครกรัมต่อลิตร ตัวตรวจวัดชนิดยูวีให้ขีดจำกัดของการตรวจวัด 0.4–2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ลักษณะของพีคที่ได้จากตัวตรวจวัดชนิดแอมพิโรเมตรี ความกว้างของฐานพีคกว้าง เนื่องจากการไหลแบบ laminar ในคาปิลลารีของตัวตรวจวัด สภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือสารละลายบัฟเฟอร์ประกอบด้วย N-(2-acetoamido)2-aminoethane sulfonic acid (ACES) 50 มิลลิโมลต่อลิตรกับโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) 22 มิลลิโมลต่อลิตร pH 6.1 ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 40 นาที ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของการเคลื่อนที่ 0.9 % ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าพื้นที่พีค 4 % และได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์โดยการเตรียมตัวอย่างแบบ solid-phase extraction (SPE) โดยใช้ polystyrene divinylbenzene copolymer เป็นตัวดูดซับ ะด้วยเมธานอล ได้ร้อยละการกลับคืน 65–116 ใช้ตัวตรวจวัดชนิดแอมพิโรเมตรี ขีดจำกัดของการตรวจวัด 0.07–0.2 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าพื้นที่พีค 4–11 %

เค็ง และคณะ (Deng et al., 1998) พัฒนารูปแบบการหาปริมาณกรดอะโรมาติก โดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโทรโฟรีซิส ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 214 นาโนเมตร ซึ่งมีสภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 57 เซนติเมตร ความยาวคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 50 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการแยกคือสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมเตตระบอเรต 13 มิลลิโมลต่อลิตร pH 9.68 ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 16 นาที ช่วงการเป็นเส้นตรง 5–100 ไมโครโมลต่อลิตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของค่าพื้นที่พีค 2.82–6.95 % เตรียมตัวอย่างแบบ solid - phase extraction (SPE) โดยใช้ Sep-pak C18 Plus เป็นตัวดูดซับ ได้ร้อยละการกลับคืน 98–108

ฟุง และลอง (Fung, & Long, 2001) วิเคราะห์ปริมาณฟีนอลและอัลคิลฟีนอลจากดินโดยเทคนิคคาปิลลารีอิเล็กโตรโครมาโทกราฟี (Capillary Electrochromatography, CEC) ตัวตรวจวัดชนิดยูวี ตรวจวัดสัญญาณที่ความยาวคลื่น 270 นาโนเมตร ใช้สภาวะคือความยาวของคาปิลลารี 45 เซนติเมตร ความยาวของคาปิลลารีที่ใช้ในการแยก 25 เซนติเมตร ภายในบรรจุด้วย ODS ขนาด 3 ไมโครเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 75 ไมโครเมตร ทำการศึกษาผลของ pH และส่วนประกอบของอะซิโตไนไตรในสารละลายบัฟเฟอร์ พบว่าถ้าเปอร์เซ็นต์ของอะซิโตไนไตรน้อยทำให้สารสามารถแยกกันได้ดีแต่ใช้เวลาในการวิเคราะห์นาน สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ Tris 4 มิลลิโมลต่อลิตรในอะซิโตไนไตรต่อน้ำในอัตราส่วน 35 : 65 (ปริมาตรต่อปริมาตร) pH 7.0 ศักย์ไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นำสารตัวอย่างเข้าคาปิลลารีด้วยศักย์ไฟฟ้า 10 กิโลโวลต์ นาน 2 วินาที ใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่า 40 นาที จีตจำกัดของการตรวจวัด ($S/N=2$) 0.0100–0.0091 มิลลิโมลต่อลิตร ทำการสกัดฟีนอลและอัลคิลฟีนอลจากดินโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือจุดวิกฤตสามารถทำให้ตัวอย่างเข้มข้นถึง 10 เท่า จีตจำกัดของการตรวจวัดฟีนอลและอัลคิลฟีนอลจากดิน 0.0032–0.0110 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม