قسم الكيمياء الحيوية

نموذج استرشادى لإجابة امتحان نظري لمادة
كيمياء الاجهزة والتحاليل الدقيقة
لطلاب الفرقة الرابعة ـ شعبة الكيمياء (مقرر اجبلري)
العام الجامعي ٢٠١٤ /٢٠١٥ الفصل الدراسي الاول

السؤال الأول:- **(٣٠ درجة)**

١ ـ تكلم باختصار عن كل مما يأتى :- **(٦ درجات)**

Rt – Chromatogram -Packed column – Rf value - thermal conductivity detector – Flame ionization detector.

Rt هوالوقت اللازم انقضاؤة من بدء حقن العينة حتى خروج المادة وظهور ال Peak

maximum على الكروماتوجرام.

– تعريف التحليل الكروماتوجرافى :– Chromatogrphy

يمكن تعريف التحليل ال كروماتوجرافى بأنه طريقة لتحليل وفصل المركبات المختلفة

وتعتمد على حدوث ما يسمى بال Differental Migration أى إختلاف فى إنتقال وهجرة المركبات نتيجة مرور مذيب أو غاز على الوسط المحتوى على المواد المراد تحليلها.

– الأساس العلمى للطرق المستخدمة فى الفصل تعتمد على توزيع المركبات المختلفة بين طورين أحدهما :–

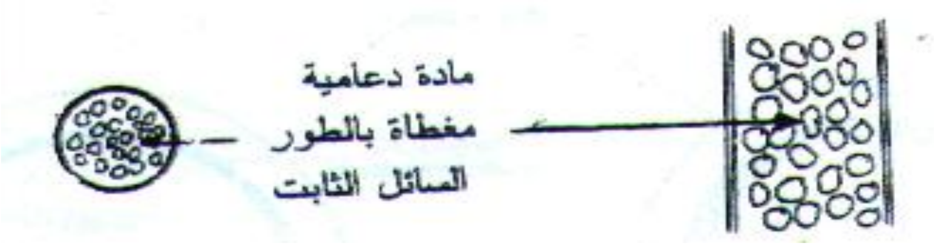
– طور متحرك Mobile Phase

– طور ثابت Stationary Phase

الأعمدة الحلزونية : Packed Column

وتستعمل فى هذه الأعمدة مادة حاملة كدعامة support فى صورة حبيبات صغيرة الحجم بينهما فراغات تسمح بسريان الغاز خلالها بمعدل مناسب كما يمكنها أن تتغلف بطبقة رقيقة من السائل المستخدم كطور ثابت ومن المواد المستعملة الزجاج المجروش أو الرمل أو بعض الأتربة الطبيعية والسوائل التى تعمل كطور ثابت وتمسك فى صورة غشاء رقيق يجب أن

تكون غير متطايرة وثابتة حراريا مثل زيت البرافين أو الزيوت المعدنية أو الجلسرين وغير ذلك من السوائل حسب نوع المركبات المراد فصلها .



RF:- لكل مركب وذلك بقياس المسافة التى سارها المركب على المسافة التى سارها المذيب.

Thermal conductivity detector جهاز الكشف القائم على التوصيل الحرارى

حيث يوجد بخلية التوصيل الحرارى سلك رفيع ترتفع درجة حرارته بتأثير تيار كهربى . وبمرور تيار ثابت من الغاز الخامل النقى فإن كمية الحرارة المفقودة من السلك تظل ثابتة وعندما يحمل تيار الغاز الخامل بعض المركبات المفصولة فإنه يحدث اختلاف فى درجة حرارة السلك يمكن تسجيله ومن الطبيعى فإن هذا الاختلاف يتوقف على كمية المركبات ونوعها وهو المطلوب الاستدلال عليه .

---

٢ -أشرح طريقة فصل وتقدير المركبات باستعمال كلامن (كروماتوجرافيا الطبقة الرقيقة ، التحليل الكروماتوجرافى السائل) (٨ درجات)

التحليل الكروماتوجرافى ذو الطبقة الرقيقة Thin layer chromatography

الأدوات التى تستخدم فى TLC ألواح زجاجية ، سليكاجيل – Spreader tray spreader ، plate holder .

*** أنواع السليكا جيل :**

Silica gel H: – سليكا جيل ذو حبيبات دقيقة بدون كبريتات كالسيوم.

Silica gel G: – تحتوى على ١٣ % كبريتات كالسيوم.

Silica gel GF: – سليكاجيل مضاف إليها دليل فلورة.

Silica gel R: – تحتوى على ٥% كبريتات كالسيوم.

Silica gel D5:– سليكاجيل D-5 مضاف إليها دليل غير عضوى مقلور.

Silica gel DF-5:– سليكاجيل تحتوى على النشا كمادة لاصقة.

*** ملحوظة:**

تتحكم أقطار جزيئات المادة الإدمصاصية فى كفاءة الفصل فمثلا طبقات الجزيئات فى السليكاجيل ذات قطر يتراوح بين ١–٥ ميكرون يؤدى إلى فصل مناسب بينما الجزيئات الكبيرة تؤدى إلى تحرك المذيب بسرعة كبيرة وظهور بقع كبيرة جدا فى الحجم نتيجة للانتشار الجانبى العالى وقلة مقدرتها على الإدمصاص.

*** طريقة الفصل والتحليل :**

هذا النظام من التحليل الكروماتوجرافى تابع لتحليل الكروماتوجرافيا الادمصاص ويعتبر النظام الثابت Stationary phase عبارة عن مادة إدمصاص مثل ثاني أكسيد الألومونيوم أو السليكاجيل مخلوط بمادة لاصقة يتم فرد مادة الادمصاص على طبقة رقيقة على شريحة زجاجية مقاس ٢٠× ٢٥ سم.

أما النظام المتحرك mobile phase عبارة عن مذيب مناسب أو مخلوط من المذيبات المناسبة قبل استعمال الشرائح يتم وضعها فى فرن للتخلص من الرطوبة ولتنشيط مادة الادمصاص . ثم يتم وضع العينة المراد فصلها بواسطة أنبوبة شعرية دقيقة على هيئة بقع وعلى أحد أطراف الشريحة يوضع خط ويسمى بنقطة البداية على بعد ٢ سم وقبل انتهاء الشريحة بمسافة ٢ سم يوضع خط يسمى بخط النهاية.

تغمس الشرائح الزجاجية فى حوض يحتوى على المذيب أو مخلوط من المذيبات ويقفل الحوض جيدا وبعد سريان المذيب حتى خط النهاية تخرج الشرائح وتجفف

تحضير طبقات رقيقة ذات سمك واحد من السليكاجيل :

توجد عدة طرق لعمل الطبقات:

١) طريقة الصب ٢) طريقة الغمر

٣) طريقة الفرد ٤) طريقة الرش

التعرف أو الكشف على أماكن الفصل.

ترش الشرائح بجواهر كشافة لظهور مواضع المركبات المختلفة وبقياس المسافة التى سارها المذيب والمسافة التى سارها مكونات العينة يمكن حساب RF .

*** التقدير الكمى بعد الاستخلاص :**

نقشط كل منطقة Zone وتوضع فى أنبوبة زجاجية وتذاب فى مذيب مناسب وترشح للتخلص من مادة الادمصاص ثم يجرى عليها التقديرات الكمية الاتية .

* استخدام الأشعة الفوق بنفسجية UV

* استخدام جواهر كشافة وقياس الكثافة الضوئية بإستخدام Spectrophotometer .

*** التقدير الكمى على الورق أو اللوح :**

توجد عدة طرق وهى

١)المقارنة البصرية

٢) التقدير بواسطة حساب مساحة البقع

٣) تقدير النفاذية للبقع الملونة أو المكربنة أو التى تمتص الأشعة الفوق البنفسجية.

*** مميزات TLC عن Paper Chromatography**

١) الوقت الذى يأخذة الفصل بواسطة TLC قصير جدا حيث لا يحتاج أكثر من نصف ساعة وبسيطة فى حين أن الوقت الذى يأخذة Paper طويل يتراوح من ١٦ – ٢٤ ساعة .

٢) تكون البقع مندمجة Compact والفصل ممتاز .

٣) تستعمل مواد ادمصاصية كثيرة منه ا مواد عضوية مثل السيليلوز أو السيليلوز المحور أو غير عضوية مثل السليكاجيل أو الالومنيا . فى حيث أن Paper يكون يعتمد فقط على الطبقة الرقيقة من السيليوز.

٤) تستعمل كميات قليلة من المواد المراد تحليلها كما إنها تستخلص كل مكونات العينة .

٥) تستعمل مواد لتعيين موضع المركبات المفصولة مثل حمض الكبريتيك وترش على السيلكاجيل أو الومنيوم دون أن تتأثر على العكس من التحليل الكروماتوجرافى الورقى .

* حجم المذيب الذى يستخدم فى عمل Slurry = ٢.٥ × عدد الألواح × سمك اللوح (سم) × بعد اللوح (سم).

* النسبة بين الماء والسليكاجيل = ٢ : ١

* السليكاجيل تحتوى على كبريتات كالسيوم بنسبة ١٠% من وزنها.

التحليل الكروماتوجرافى السائل

يعتبر الـ HPLC أحد الطرق الأساسية لتحليل المواد العضوية وهو يمتاز مثل طرق التحليل الكروماتوجرافي الأخرى بالدقة والحساسية العالية كما أن مدى استخداماته لاتع تمد على تطاير العينة أو تأثرها بالحرارة كما هو الحال فى الـ GLC ويمتاز جهاز الـ HPLC بكفاءته العالية جداً على الفصل بالإضافة إلى استخدامه فى فصل العديد من المركبات المختلفة مثل الفينولات ، الفيتامينات والسكريات.

أساسيات جهاز الـ Principles of HPLC

يقوم جهاز HPLC بفصل مكونات العينة ثم التعرف عليها وتقديرها كمياً. ويتم الفصل عن طريق توزيع العينة مابين طورين أحدهما الطور المتحرك (سائل) والآخر طور ثابت (سائل أو صلب) وعادة بكون الطور الثابت فى عمود طوله حوالي ٢٥ سم وقطره ٤ م م . وتعتمد كفاءة الفصل على مواصفات العمود وبصفة خاصة قطر جزيئات المادة المعبأة ويلاحظ أن خفض قطر الجزيئات يؤدي إلى تحسين أداء العمود بالإضافة إلى أنه يرفع الضغط بالتالي نحصل على معدل سريان مناسب للطور المتحرك خلال العمود ولهذا السبب فإن أجهزة HPLC الحديثة يطلق عليها أجهزة الضغط العالي الكروماتوجرافي السائل حيث تدفع المضخة الطور المتحرك داخل عمود الفصل والذي بدوره يفصل العينة لمكوناتها والتي تمر خلال الـ Detector حيث عندما يمر كل مكون من مكونات العينة خلال الـ Detector فإنه يحدث تغير فى الإشارات الكهربائية يتم تسجيلها على خريطة متحركة لتعطي كروماتوجرام .

ماهو الاساس العلمى الذى بنى علية جهاز الامتصاص الذرى Atomic Absorbtion مع شرح مبسط لتركيب الجهاز .
(٨ درجات)

يحدث الامتصاص الذرى بأن تمت ص الذرات الموجودة في حالتها المنفردة الأشعة الضوئية عند طول موجي معين وتنتقل إلى الحالة المثارة وتزداد كمية الأشعة الممتصة عند هذا الطول الموجى بزيادة عدد ذرات العنصر الموجودة في مسار الأشعة والعلاقة بين كمية الأشعة الممتصة وتركيز العنصر المراد تقديره يمكن الحصول عليها باستعمال مادة قياسيه معروفة التركيز تحتوى على العنصر المراد تقديره .

*** تركيب الجهاز : Instrument structure**

يتركب الجهاز من الأجزاء الآتية :

١ -مصدر الأشعة **Radiation source**

٢ -وحدة تحويل العناصر إلى الصورة الذرية **Atomizer (Burner system)**

٣ -وحدة فصل الأطوال الموجية **Monochromator**

٤ -وحدة قياس طاقة الأشعة **Detector**

3- To prepare a standard soln. 15 ml of 0.0215 M soln. of KMnO4 was diluted to 500 ml. A series of standard was prepared by diluting from 1 to 10 ml of the main soln. at intervals of 1 ml in 25 ml of water. A steel sample having a mass of 0.5 g was dissolved in acid and after appropriate treatment the soln. was diluted to 100 ml. The resulting soln. had a color intermediate between the fourth and fifth standards.

Calculate the percentage of the Mn in the steel.

(٨ درجات)

Con. of stock solution = 15x0.0215 = 500 xC

C = (15x0.0215)/500 = 0.000645 M

Con. of fourth standard = 4x0.000645 = 25xC

C = 0.0001032 M

Con. of fifth standard = 5x0.000645 = 25xC

C = 0.000129 M

Con. of steal solution = (0.0001032 + 0.000129)/2

= 0.0001161 M

Percentage of Mn of steel

= (0.0001161x100x55x100)/ (1000x0.5) = 0.13%

....

السؤال الثاني:

(٣٠ درجة)

أ - أذكر أنواع Ion exchange chromatography مع ذكر مثال.
ب -ماذا يعنى الفصل بـ Gel filtration.
ج- كيف يمكن تقدير الحماض الأمينيه بواسطة جهاز الـ Amino acid analyzer مبينا تركيب الجهاز وتجهيز العينة وميكانيكية الفصل وتفاعل النـنهيدرين مع الأحماض الأمينيه الخارجه من العمود وعيوب هذه الطريقة وكيفية التغلب عليها.
د- ما هى الأنواع المختلفة للفصل الكهربى وماذا يقصد بكل من مع الشرح:

- **SDS-PAGE.**
- **Factor affecting migration of protein.**
- **Formation of polyacrylamide gels.**

أذكر أنواع Ion exchange chromatography مع ذكر مثال.

– **Ion Exchange Chromatography** حيث يعتمد فصل وتحليل المركبات علي إمكانية تبادلها مع الأيونا ت الموجودة علي سطح مواد خاصة تعرف بمواد التبادل الأيونى Ion exchanger وهي عبارة عن مادة غير ذائبة تحتوي علي بعض المجموعات التي تحمل شحنات ويحيط بها أيونات ذات شحنات مضادة وهذه الأيونات حرة الحركة بعكس المجموعات المشحونة التي تكون مرتبطة كيميائيا بجزئيات ما دة التبادل الأيونى . ويمكن استبدال الأيونات بأيونات أخري تحمل نفس الشحنة دون أن تتأثر المادة الأصلية تسمي matrix. فإذا كانت المادة matrix تحمل شحنات موجبة فإن الأيونات المحيطة بها تكون سالبة وبالتالي فإن المادة يمكن أن يتم عليها تبادل أيونات سالبة الشحنة ول ذلك يطلق عليها اسم Anion exchanger والعكس إذا كانت المادة الأصلية matrix تحمل شحنات سالبة فإن الأيونات المحيطة بها تكون موجبة الشحنة وبالتالي يمكنها التبادل مع أيونات موجبة مع أيونات موجبة ولذلك تسمي Cation exchanger كما في الشكل:

***It is possible to have both positively and negatively charged exchangers.**

* Positively charged exchangers have negatively charged counter-Ions (anions) available for exchange and so are termed anion exchangers.

* Negatively charged exchangers have positively charged counter ions (cations) and are termed cation exchangers.*

Anion exchanger with exchangeable counter-ions **Cation exchanger with exchangeable counter-ions**

$$\text{Relative mobility} = \frac{\text{Distance of protein}}{\text{length after distaining}} \times \frac{\text{Length before distaining}}{\text{Disatnce of day migration}}$$

أ - ماذا يعنى الفصل بـ Gel filtration.

حيث يعتمد فصل المركبات المختلفة على اختلاف حجمها الجزئيى molecular size مايسبب اختلافها فى النفاذية permeability بين حبيات مواد فى صورة جيل واشهرها مادة Sephadex فجزئيات المركبات الكبيرة الحجم لايمكنها النفاذ داخل فرغات الجيل لذلك فهى تمر اسرع مع المذيب بعكس الجزيئات الاخرى الصغيرة الحجم واذى يمكنها النفاذ فى الفرغات الموجودة بين حبيبات الجيل لذلك تخرج المركبات بالتتابع على حسب تناقص حجمها الجزئيى وتعرف ميكانيكية الفصل هذة بال Molecular exclusion.

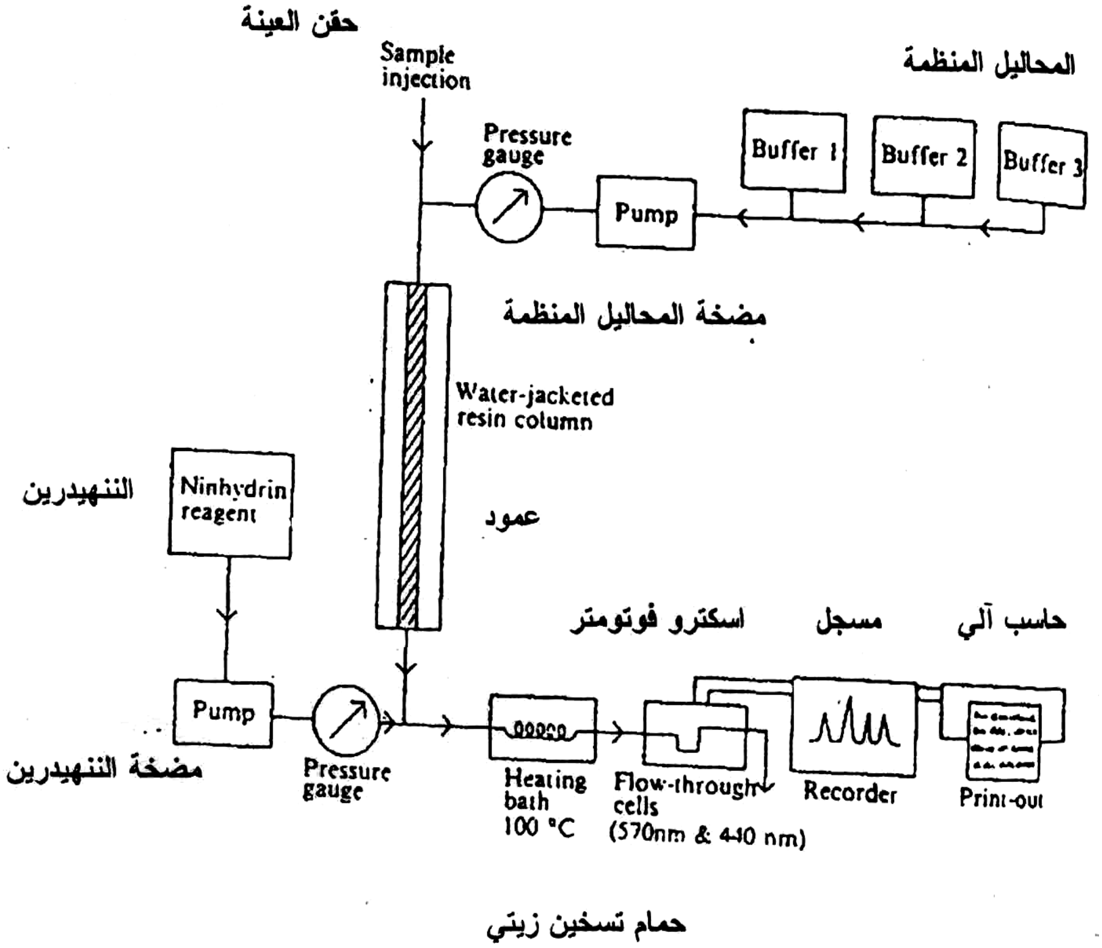
ج - عينة نباتيه كيف يمكن تقدير الأحماض الأمينيه بها بواسطة جهاز Amino acid analyzer مبينا تجهيز العينه – ميكانيكية الفصل وعيوب هذه الطريقة وكيف يمكن التغلب عليها.

جهاز تحليل الأحماض الأمينية :-

Amino acid analyzer

تقدر الأحماض الأمينية وصفياً وكمياً باستخدام عمود يحتوى علي راتنج التبادل الأيوني ويمرر خلاله الطور المتحرك حاملاً معه الأحماض الأمينية المفصولة كل علي حدة ثم يتفاعل مع الننهيدرين ويتكون معقد لونى . والجهاز يعتمد أساساً علي ضخ Pumped محاليل منظمة تختلف في درجة حموضتها أو قوتها الأيونية Ionic strength خلال عمود الراتنج Resin column المزود بترموستات لضبط درجة حرارته . وقد حدث تطور فى الجهاز باستخدام راتنجات ذات نوعية عالية ونظام للحقن الآلى ، مع أنظمة للكشف ذات حساسية عالية . وهذا

أدى إلي تقليل وقت التحليل من أيام إلي ساعات . الإضافة إلي تقديرها كمياً حتى وإن كان تركيز الأحماض الأمينية أقل من $١٠^{-٩}$ مولر.



رسم تخطيطي لجهاز تحليل الأحماض الأمينية باستخدام النتهيدرين للتقدير الكمي

الشكل التخطيطي السابق يبين أجزاء جهاز تحليل الأحماض الأمينية وهي:

١. محاليل منظمة ذات درجة حموضة مختلفة عادة يستخدم ثلاث محاليل منظمة ١ ، ٢ ، ٣ لها درجة حموضة ٣.٢٥ ، ٤.٢٥ ، ٥.٢٨ علي التوالى وتعمل كطور متحرك لإحلال الأحماض الأمينية .
٢. مضخة لدفع المحاليل المنظمة داخل العمود Buffer pump .
٣. وسيلة لحقن العينة Sample injection .
٤. عمود راتنج وبه وسيلة لضبط وثبات درجة حرارة الفصل Resin column.
٥. مضخة لدفع الجوهر الكشاف ننهيدرين Ninhydrin pump.
٦. حمام زيتي Reaction coil.
٧. خلية لتقدير الكثافة اللونية للمحلول Flow cell عند الطولين الموجين ٥٧٠ و ٤٤٠ نانوميتر.
٨. مسجل أو حاسب ألى Computer .

تقدير الأحماض الأمينية :

لتقدير الأحماض الأمينية المكونة للبروتينات لابد من إجراء عملية التحليل الحامضى للسلاسل الببتيدية وذلك بالتسخين علي درجة ١١٠°م في وجود حامض HCl بتركيز ٦ عيارى لمدة ٢٤ ساعة وبعد ذلك يتم التخلص من الحامض الزيادة والتجفيف ثم تذاب العينة في محلول منظم من السترات pH = ٣ ثم تحقن العينة في جهاز تقدير الأحماض الأمينية Amino acid analyzer .

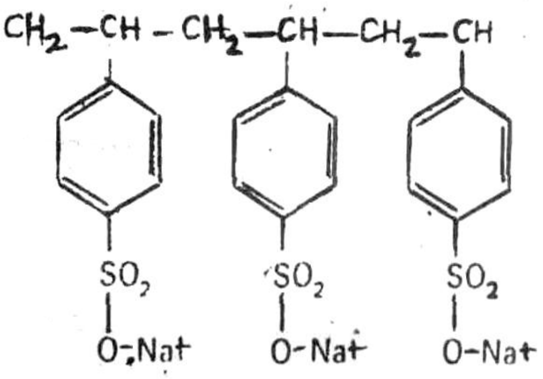
طريقة الفصل :

فصل الأحماض الأمينية يكون علي أساس التبادل الأيوني Ion exchange chromatography ويتكون الجهاز من عدد ٢ عمود :

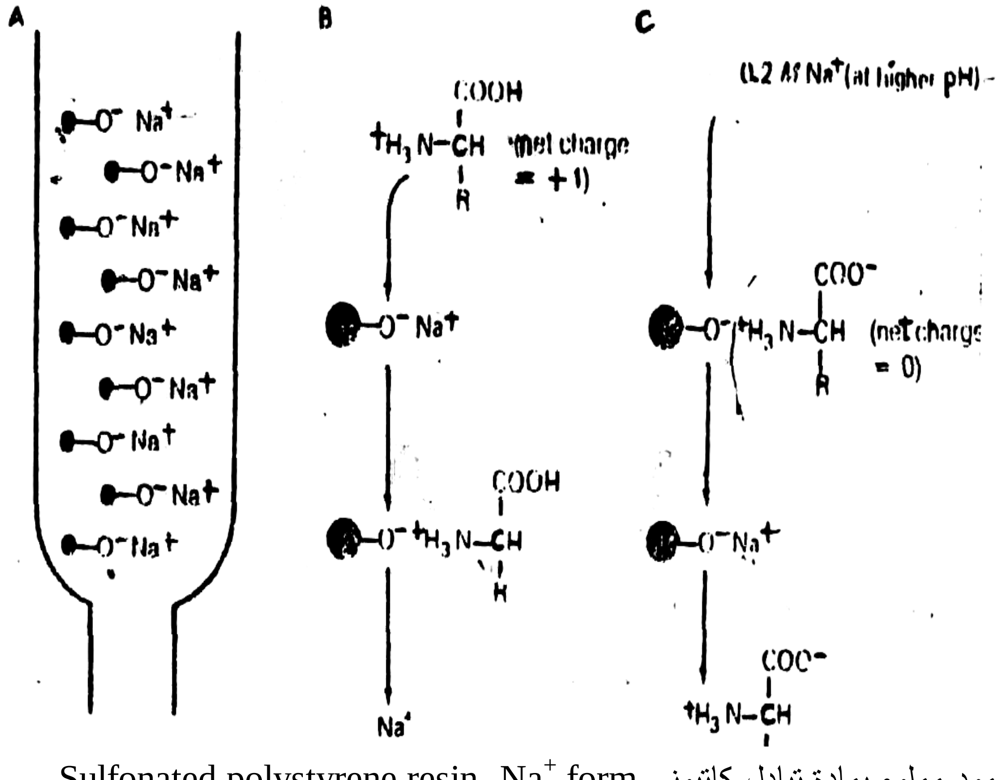
العمود الأول Short column: يستخدم في فصل الأحماض الأمينية القاعدية .

العمود الثاني Long column: يستخدم في فصل باقى الأحماض الأمينية .

كل من العمودين مملوء بمادة ذات شحنة سالبة عليها ايون الصوديوم تسمي (Sulfonated polystyrene resin Na^+ form) .



فعند إضافة المحلول الحامضى لمخلوط الأحماض الأمينية pH = ٣ للعمود المعبأ بالمادة فإن الأحماض الأمينية القاعدية ترتبط مع مادة العمود ب قوة بينما الأحماض الأمينية الحامضية ترتبط برابطة ضعيفة بمادة العمود وباستعمال محاليل منظمة مختلفة في درجة الحموضة pH فإنه يمكن فصل Eluation كل نوع من الأحماض علي حدة . والشكل التالى يوضح ذلك :



(A) عمود مملوء بمادة تبادل كاتيوني Sulfonated polystyrene resin- Na^+ form

(B) تبادل الحامض الأميني مع أيون الصوديوم .

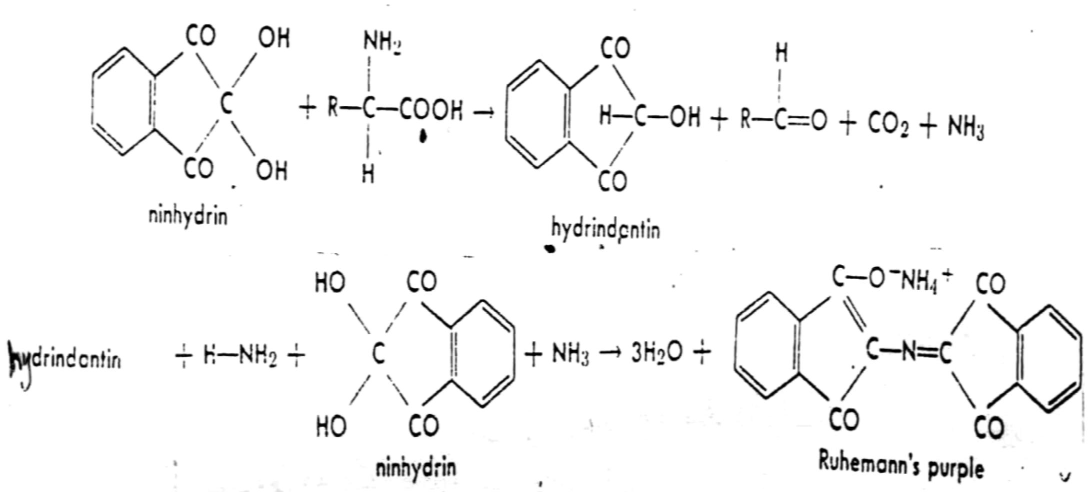
(C) إحلال Na^+ محل الحامض الأميني باستخدام محلول ذو pH عالى.

الحامض الأميني الذى يخرج من العمود بعد إجراء عملية Elution يتفاعل مع النهيدرين علي درجة ١٠٠°م ويعطى لون بنفسجي ويتم قياس تركيز اللون باستخدام جهاز

Colorimeter. كل الأحماض الأمينية الموجودة في صورة α-amino acids تعطي اللون البنفسجي بينما الحامض الأميني البرولين والحامض الأميني هيدروكسى برولين يعطي لون أصفر حيث أنه لا يوجد في صورة α-amino acids ومن عيوب التحليل الحامضى للبروتينات يعمل علي تحويل الجلوتامين إلي جلوتاميك والاسبراجين إلي إسبراتيك .

ويعمل أيضا علي أكسدة الأحماض الأمينية الكبريتية والتربتوفان ولكى نقلل من عملية الأكسدة يتم أثناء عملية التحليل الحامضى إضافة مواد مانعة للأكسدة مثل المركبتوإيثانول أو الثيوجليكوليك أسد.

ومعادلة تفاعل النهيدرين تكون علي الصورة التالية:



يتكثف ناتج تفاعل النهيدرين مع الأمونيا مكونا مركب لونه أزرق أو بنفسجي ويتطلب هذا التفاعل وجود حامض أميني به مجموعة أمين منفردة في الموضع ألفا

د- ما هى الأنواع المختلفة للفصل الكهربى وماذا يقصد بكل من مع الشرح:

- **SDS-PAGE.**
- **Factor affecting migration of protein.**
- **Formation of polyacrylamide gels.**

- **SDS-PAGE.**

- يستخدم في تحليل ومعرفة عدد وحجم السلاسل البروتين polylepetide البروتين المحضر يعامل بزيادة من soluble thiol
- Sodium dodecyl sulfate(SDS), (R= SH, e.g Bmercaptoethanol)
- وجد أن روابط (s-s) تحول إلي R-SH وتنفرد السلاسل البيتيدية كل علي حده وتنفصل كل سلاسل بيتيدية متشابهة في band واحد ويمكن تقدير التحرك من المعادلة السابقة

-

- $$Relative\ mobility = \frac{Distance\ of\ protein}{length\ after\ distaining} \times \frac{Length\ before\ distaining}{Disatnce\ of\ day\ migration}$$

<u>العوامل التي تؤثر علي معدل تحرك جزيئات البروتين في المجال الكهربي:</u>

Factors affecting migration

أ –**الشحنةCharge**: يزداد معدل التحرك بزيادة الشحنة النهائية Net charge وهي تعتمد بصفة عامة علي درجة حموضة الوسطPH.

وفيما يلي تأثير تغير درجة حموضة الوسط علي الشحنة في البروتينات والأحماض الأمينية كبعض أمثلة:

NH_3^+ - R-COO^-

تعرف الـ PH التي يكون عندها صافي الشحنة الكهربائية net charge الجزئ البروتين أو الحمض الأميني يساوي صفر باسم نقطة التعادل الكهربي Isoelectric point ومن هذه الدرجة منPH لا يتحرك الجزئ في المجال الكهربي ويعبر عن الـ PH والمقابلة لنقطة التعادل الكهربي PI (Isoelectric PH).

يمكن حساب قيمة الـ PH في المحلول بمعرفة معامل انقسام المجموعة المتأينة فمثلا في حالة الأحماض الأمينية الأحادية الأمين والكربوكسيل فإن Pka_1 هي معامل انقسام مجموعة Pka_2,CooH هي معامل انقسام مجموعة NH_2 وبحسب قيمة PI لما يلي

$PI= 1/2 (Pka_1+ Pka_2)$

مثال: Pka_1 للحامض الأميني جلسين = 2.3- Pka_2 =9.6

P1= ½ (2.3 +9.6)=6

أما في حالة الأحماض الأمينية ثنائية الكربوكسيل (جلوتاميك –اسبارتيك) تحتوي علي ثلاثة مجاميع قابلة للتأين وبالتالي يكون لها ثلاثة Pka وبكتابة حالات التأين المحتملة لحمض الاسبارتيك بدء من الوسط الحامضي الشديد ثم تزداد PH حتى تصل إلي القاعدي مرورا بحالة التعادل.

ب– الحجم Size

يقل معدل التحرك بالنسبة للمركبات ذات الأوزان الجزيئية الكبيرة نظرا لزيادة الاحتكاك وقوى التجارب الالكتروستاتيكي الناتجة من الوسط المحيط – فالجزيئات البلورية (ذات جزئ

صغير) لا تتأثر نسبيا بالادمصاص علي الورق في حين أن الجزيئات الفردية (ذات وزن جزئي كبير) جزئيا علي الوزن وتترك trail tailing خلف كل شريط من المواد المفصولة الرئيسية.

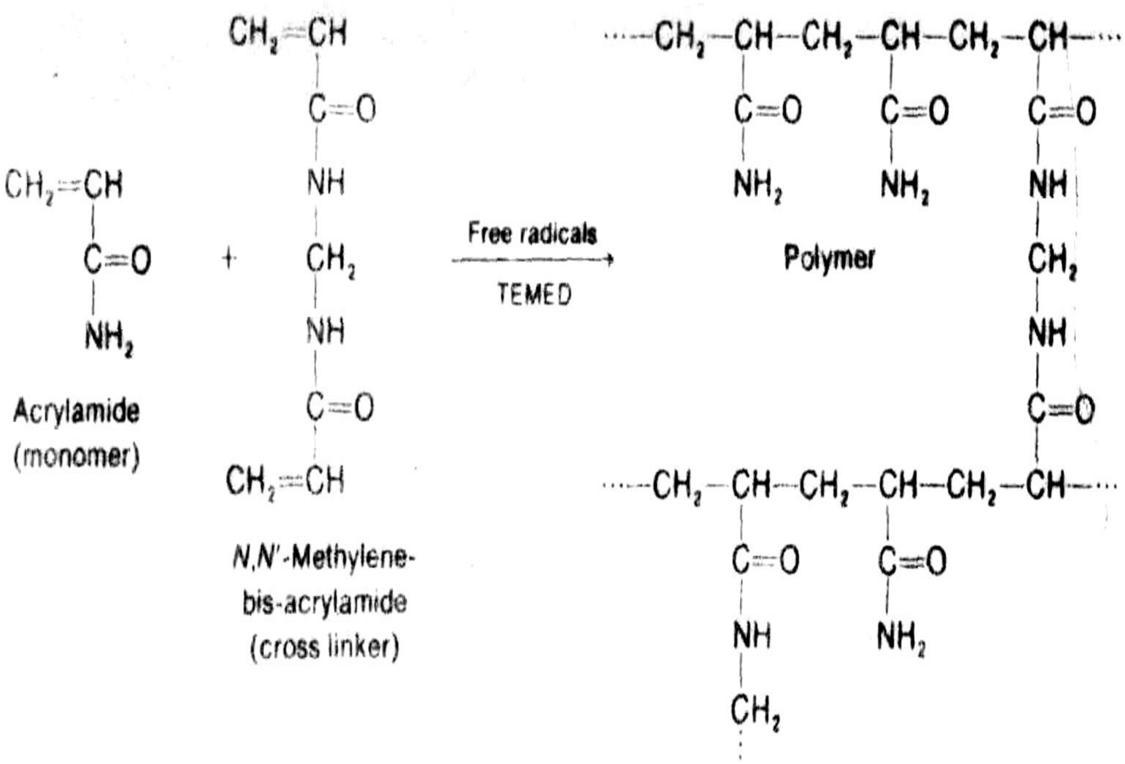
جـ- الشكل Shape:

تظهر الجزيئات ذات الحجم المتساوي والتي تختلف في شكلها مثل البروتين الليفي والدائري اختلاف متباين في تحركها نظرا لاختلاف تأثير الاحتكاك وقوى التجاذب الالكتروستاتيكي.

ويمكن وضع العوامل التي تؤثر علي معدل التحرك في المعادلة التالية

$$\textbf{Mobility of molecule} = \frac{\left(\begin{array}{c}\textbf{Applied}\\ \textbf{voltage}\end{array}\right)\left(\begin{array}{c}\textbf{Net charge}\\ \textbf{on the molecule}\end{array}\right)}{\left(\begin{array}{c}\textbf{Friction of the molecule}\\ \textbf{Molecular size and shape}\end{array}\right)}$$

- **Formation of polyacrylamide gels.**


Acrylamide
(monomer)
N,N'-Methylene-bis-acrylamide
(cross linker)
Free radicals
TEMED
Polymer