الباب السابع

الصفات الكهروكيميائية
Electrochemical Properties

تعتبر المبادلات الأيونية المنتفخة كإليكتروليت مركز من حيث عناصر أيونية واحدة، والمجموعات الأيونية الثابتة غير المتحركة، والصفات الكهروكيميائية لتلك المواد غير عادية ولها تطبيقات عديدة، وأغشية المبادلات الأيونية إحدى تلك التطبيقات المهمة. وسنبدأ في شرح الصفات الكهروكيميائية الأساسية للمبادل الأيوني.

الموصلية الكهربية : Electric conductivity

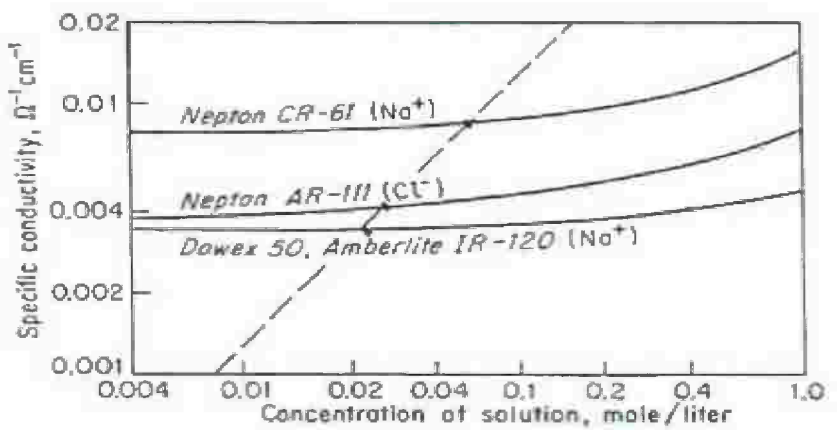
تعرف الموصلية الكهربية النوعية للمواد، وذلك عن طريق التركيز والتحركية لحامل الشحنة (الإلكترون أو الأيون). والمبادلات الأيونية تشبه إلى حد كبير المحاليل الإليكتروليتية، وبالتالي تعتبر موصلات أيونية. وتركيزها أكثر من واحد مولار. وبالتالي الموصلية الكهربية أقل – أي أن التحركية الأيونية في المحلول أعلى منها. ولو عند تراكيز متساوية. وعلى نحو آخر. تعتبر المبادلات ضعيفة الاتصالية، حيث كما ذكرنا أن التحركية الأيونية صغيرة جدا.

الموصلية للأيون يمكن تناولها من جزئية معامل الانتشار من المعادلة: $U_i = D_i \mathfrak{F} / RT$ والمعادلة $I = \mathfrak{F} \Sigma Z_i J_i$ ومعامل الانتشار في المبادلات الأيونية والاتصالية يمكن لنا تناوله من عدة عوامل فيزيائية مختلفة المجال :

$\overline{C}_A = o, r = r_o, \quad r \rangle o$ وتلك العوامل التي تعين الموصلية الكهربية في المبادلات مفهومة، وتعزز الموصلية النوعية بالعوامل الآتية :

1- تراكيز عالية للمجموعات الأيونية الثابتة.
2- انخفاض درجة التشابك للمبادلات.
3- حجم صغير لأيون العد وتكافؤ أدنى.
4- التركيز العالي للوسط عند الاتزان مع المبادل الأيونى.
5- درجة الحرارة المناسبة.

ويعين تراكيز شحنة المبادلات الأيونية المحمولة من تركيز المجموعات الأيونية الثابتة والمحلول، وتعين التحركية من درجة التشابك والحرارة. والقيم الموصلية النوعية المطلقة للمبادلات المعروفة في الشكل – قلوي أو هاليد تأخذ الدرجة من 10^{-3} وحتى 10^{-1} لكل أوم لكل سم على التوالي. والموصلية عموما ليست ثابتة، بحيث تعتمد على عدة عوامل منها طبيعة أيون العد، درجة التشابك، تركيز الوسط عن الاتزان. طالما تركيز المحلول مخفف $C \ll X$ فالموصلية للمبادل الذي له تركيز أيونى عال تكون عالية عن ما هو في المحلول. وعندما يزداد تركيز المحلول، فالتركيز في المبادل أيضا يزداد ولكن بدرجة أقل، وبالتالي تكون الموصلية للمحلول أسرع عنه في المبادل وفى آخر الأمر يصبح أكبر من واحد. وتأثير التركيز الأيوني العالي في المبادل في ذاك الوقت سيعادل بواسطة التحركية الأيونية العالية في المحلول. أنظر الشكل (1).

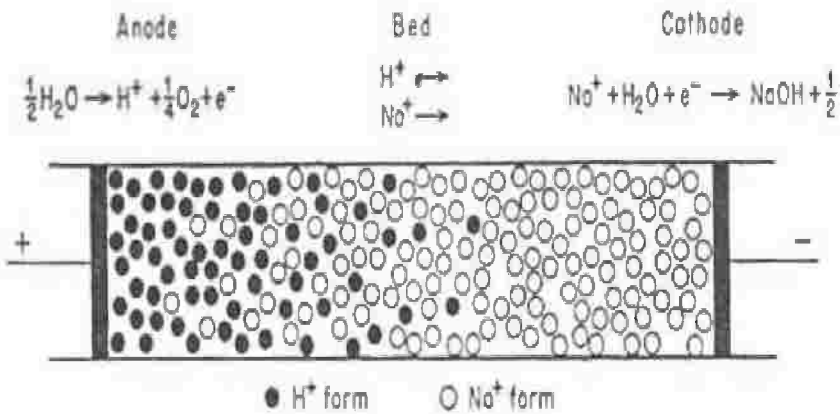


شكل (1): الموصلية النوعية لمبادلات أيونية مختلفة في الشكل Na^+ أو Cl^- بالاتزان بمحلول كلوريد الصوديوم والموصولية الأيونية للمحلول الممثلة بالخط المقطع

فنقطة التعادل بين المبادل والمحلول تعرف بنقطة الموصلية المتساوية **equiconductivity point**.

نتائج مهمة تم الحصول عليها لمبادلات أيونية جزئية الهيدردة، ويقل معامل الانتشار الذاتي للأيون مع تقدم إزالة الهيدردة،كذلك تقل الموصلية النوعية.

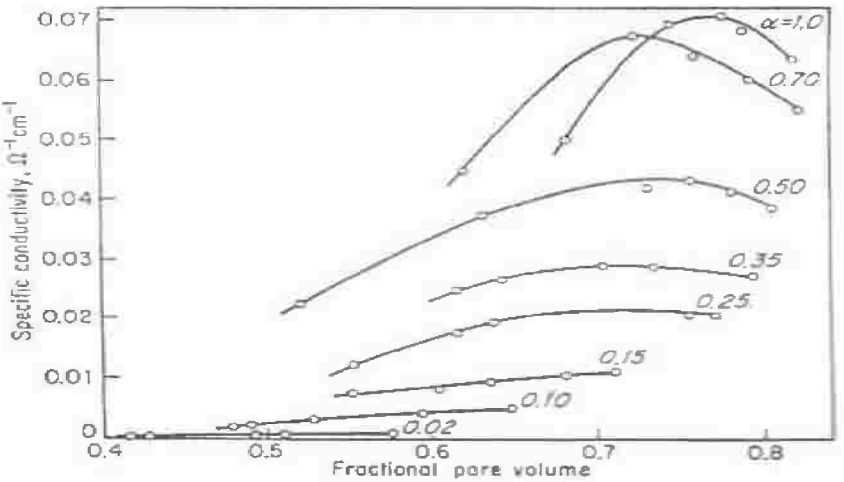
وعلى أية حال ربما تحدث استثناءات. والاتصالية النوعية ربما تأخذ مكان خلال قيمة عالية عند حالة انتفاخ محددة شكل (2) وجود سببين حول هذا التأثير أحدهما. ففي الراتنجات المنخفضة التشابك، فتأثير معامل الانتشار الذاتي لأيون العد ربما يزداد مع إزالة الهدردة، وبسبب الانكماش للراتنج الذي يختزل مسافة القفز من سلسلة إلى سلسلة. أنظر شكل (2).



تأثير الانتفاخ :

أى الزيادة في الشبكة، وانكماش المبادل يزيد أيونات العد لكل وحدة حجم. هذه الزيادة في عدد الشحنات المحمولة ربما تفوق النقص في التحركية الأيونية. ولكن بالنسبة للمبادلات غير العضوية ليست فيها تلك الصفة الانكماشية عند التجفيف. وعموما الراتنجات الجافة ضعيفة الاتصالية. والحقيقة أن الموصلية للمبادل عالية في المحلول

المخفف، والتي يمكن استخدامها فى إعادة التنشيط، واستخدامها للفصل الأيوني. فلو أمرر تيار مباشر خلال عمود من المبادل، فالانتقالات للشحنات تتم بواسطة أيونات العد في حبيبات المبادل. وتتقدم عناصر أيون العد نحو القطب المضاد له في الشحنة – شكل (3).



شكل (3) : الموصلية النوعية لمبادل كاتيونى ضعيف، ومبنيا على درجة التشابك .

حيث يلاحظ وجود العناصر على هيئة حزم مستقلة الواحد عن الآخر فى حالة تتابع في التحركية.

أعداد النقل وأعداد الحمل :

Transport and migration numbers

أعداد النقل (t_i) للعناصر تعرف بعدد المولات من العناصر المنتقلة بواسطة واحد فاراداى للتيار خلال مقطع عرضي في الاتجاه الموجب للتيار. ويحث التيار الكهربي عملية الانتقال داخل في المسام. وبالتالي حدوث فرق سواء في الشبكة، المذيب أو في مسام السائل المعتبرة كساكنة. والشبكة حينئذ هي المرجع لعملية امتصاص المذيب (المحلول). وبالتالي اختيار الشبكة كشكل مرجعي– وعليه يتم اعتبار انتقال المذيب. وتبعا للتعريف السابق أعداد الانتقال للأنيونات سالبة، وهنا فإن الأنيونات تنتقل في الاتجاه المعاكس إلى التيار الموجب.

أعداد الحمل: تعرف بالكسر من التيار المحمول بواسطة العناصر. وطبقا لهذا التعريف: فأعداد الحمل هي إذا حاصل لأعداد النقل والتكافؤ الكهربي الكيميائي للعناصر،

بحيث تعتبر صفر للمذيب (متعادل كهربي) وبهذا التعريف على كل أعداد الحمل مساوية للوحدة.

$$Zi\ ti = 1 \qquad -1$$

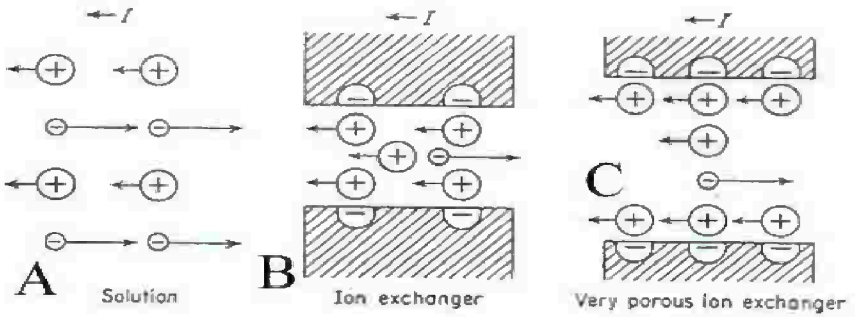
وفى المحاليل الإليكتروليتية المتجانسة فإن تركيز الكاتيونات والأنيونات متكافئة. إذا النسبة لأعداد الحمل تعين بواسطة النسبية للتحركية الأيونية فقط. ولكن الوضع مختلف فى المبادلات الأيونية. حيث تركيز أيون العد يفوق بكثير المحلول وخصوصا لو المحلول مخفف عند حالة الاتزان مع المبادل الأيوني (استثناء دونان). ولو طبقنا تيار كهربي على المبادل فالحمل للتيار الكهربي هنا إنجازه مقصورا على أيونات العد، وأعداد الحمل لأيون العد مساوية للوحدة تقريبا. وأن التيار الكهربي ينتقل في المبادل الأيوني تبعا لأيونات العد المسيطرة. ومهما يكن، عندما يزداد تركيز المحلول يقل تأثير استثناء دونان، وعليه زيادة الأيون المصاحب في المبادل قد يؤدى إلى نقص في أعداد الحمل لأيونات العد.

انتقال المذيب والموصلية الحملية :

Transference of solvent, convection conductivity

يؤدى تطبيق مجال كهربي ثابت على محلول إليكتروليتى إلى هجرة أيونية للكاتيونات إلى المهبط والأنيونات إلى المصعد. والمجال الكهربي يشابه أي قوى كهربية أخرى، يعجل الجسيمات، وتزداد سرعتها، وتزداد نسبة إحتكاكها مع الوسط المحيط بنسبة سرعتها وتصل إلى حالة الاتزان واحد بآخر، هذه الحالة الثابتة من الاتزان تصل في فترة زمنية قصيرة بعد تعرضها للمجال الكهربي.

وبالنسبة للمحلول الإليكتروليتى الذي يحتوى على كاتيونات وأنيونات متكافئة، فالمجال الكهربي يضيف عزم متساو عليهما، والاحتكاك مساوي لقوى ناقل الكهرباء، والقوى الموجودة على المذيب متزنة. بصرف النظر عن الفرق في معدل الهجرة وتكافؤ الأيون. بمعنى أن القوى على ثنائي التكافؤ مزدوج، برغم حجم التأثير على الأنيون الأحادي التكافؤ، بالنسبة للمذيب لا يحدث له انتقال، ولكن في المبادل الأيوني يأخذ شكل مختلف حيث أيونات العد هي الأغلبية، التي تأخذ عزم أكبر على المذيب عن الأيونات المصاحبة – شكل (4).



شكل (4): الهجرة الأيونية خلال مجال كهربي في محلول إليكتروليتى مائي (A) في مبادل كاتيونى (B) وفى مبادل آخر كاتيونى حال المسام (C)

ويحمل المذيب على طول بواسطة أيونات العد وبالتالي يوجد حمل في الاتجاه لانتقال أيون العد، ويعتمد ميل الحمل على تركيز أيون العد، المجال الكهربي، مقاومة مرور مواد التبادل الأيوني. " ويعوم أيون العد بشكل مناسب في المحلول " والأيونات المصاحبة عكس المد والجزر في المحلول. وأيونات العد في الشبكية تتحرك أسرع عن ما هو في حالة السائل الساكن. وإضافة إلى معدل انتقال أيون العد، فالحمل لمسام السائل تزيد الموصلية الكهربية للمواد. هذه الموصلية الفائضة المؤدية إلى الحمل تعرف بالموصلية الحملية. وموصلية الحمل في المبادلات الأيونية عالية مع التراكيز العالية "للمجموعات الثابتة "، وتنخفض المقاومة عند الاتزان مع المحلول المخفف.

علاقات وصفية "كمية – تدفيقية" : Quantitative relations

تعتمد ظاهرة المجال الكهربي المؤثرة على المبادل الأيوني في المقام الأول على التراكيز والتحركية للأيونات المتحركة وعلى صفات مواد التبادل الأيوني. وبالنسبة للتفسير الفيزيائي للعوامل المهمة. والتنبؤ لأي نظام فإنه يجب استخدام نموذج، والمعالجة موضوعة على نموذج بسيط كما يلي :

من المعلوم بأن مسام المبادل الأيوني تشبه الإسفنج، متجانس الأبعاد مكروسكوبية، ولا توجد عموما معلومات تفصيلية أو افتراضات حول تركيب المسامات من ناحية (الشكل، الأتساع، درجة التشابك) وكل الكميات المستخدمة (التراكيز، الفيض، شدة التيار، التدرج، درجة الميل) تعزو إلى وحدة الحجم، المقطع العرضي، الطول لكل مواد التبادل الأيوني بالأحرى غير الفتحات) كل تلك الصفات يمكننا التوصل إليها بواسطة القياسات الميكروسكوبية. كما يمكن اعتبار اثنين من الصفات لتمييز البناء الهندسي للمسام. مقاومة السريان والحجم الكسرى للمسام. هذا النموذج وضع بواسطة **Schmide 1950** .

في هذا الجزء. تتناول المناقشة حدوث عمليات حجم عناصر المواد عند حالة الاتزان. قبل وبعد تطبيق المجال الكهربي مع عدم تغير في التركيز. وهذا يعنى عدم وجود تدرج في التركيز، معامل النشاطية، الضغط، الانتقال للعناصر المتحركة مبنى على الانتقال الكهربي والحمل.

ويتناسب معدل تحرك أيون **(i)** محيط السائل في المجال الكهربي على قوة المجال الكهربي المؤثر على الأيون. هذه القوة تنتج تدرج فرق الجهد الكهربي φ وتكافؤ العنصر Z_i وبواسطة تعريف معامل التناسب للتحركية الكهربية الكيميائية U_i، والانتقال الكهربي $(J_i)_{ele}$ للعناصر **(i)** النسبي المحيط مسام السائل " حاصل معدل الحركة " والتركيز C_i للعنصر. للمعادلة **(33)** في الباب السابق.

$$(J_i)_{el} = -z_i \overline{C}_i U_i \ grad \ \varphi$$

وفى المبادلات الأيونية، الانتقال النسبي إلى الشبكية، ينتج من التماثل للانتقال النسبي لمسام السائل والنقل بواسطة الحمل لمسام السائل. وتبعا للعمليات أللانعكاسية الثيرموديناميكية. والثاني هو ناتج للتركيز **Ci** والمعدل **(b)** عندما يتحرك مركز الثقل لسائل المسام **Conter of gravity**

$$(J_i)_{can} = - \overline{C}_i \ b \qquad - 2$$

وطبقا لهذا التعريف **(U_i)** - التحركية الكيميائية الكهربائية– هي معدل حركة لأيون محث بواسطة وحدة قوة.

والتحركية موجبة في الكاتيونات والأنيونات معا ونعبر عن وحدة الكهرباء أو بوحدات - **(C g S)** – بلانك – أستخدم القوة بوحدة الداين. وغالبا ما تؤخذ تعاريف مختلفة وهى مثلا معدل الحركة في الاتجاه الموجب للتيار عند قوة مجال لوحدات فولت لكل سم. لذا التحركية للأنيونات بإشارة سالبة. ومعامل الحمل يعطى علاقة بوحدات **(C g s)** - سم جرام ثانية وهو واحد فولت كولومب **$Cm^{-1} = 10^7$** داين.

وبالتالي الانتقال النسبي إلى الشبكية هو :

$$J_i = (J_i)_{e\ell} + (J_i)_{con} = -Z_i U_i C_i \ grad \ \varphi + C_i b \qquad - 3$$

يلاحظ أن كل المقادير في المعادلة (3) تشير لوحدة الأبعاد لمواد التبادل الأيوني وليست للمسام. فالوحدة **b** = معدل الحمل " الخطى " في اتجاه التيار نوعا ما عن المعدل الكلى للحركة في المسام المتعرج.

φ تشير لوحدة الطول للمواد وليست لطريق المسام المتعرج والتركيز **C_i** وحدة الحجم$^{-1}$ لكل المواد وليست لمسام السائل فقط. ولكل مول لعنصر**(i)** يحمل شحنة كهربية **Z_i** - فارادای إذا كثافة التيار الكهربي **(I)** (حاصل انتقال الشحنة لكل وحدة زمن ووحدة المقطع العرضي للمواد) هو :

$$I = f \ \Sigma_i \ Z_i \ J_i \qquad - 4$$

وعند الثبات للتعادل الكهربي (i) - تتطلب الشحنات الكهربية لاتزان عناصر كل المواد واحد بآخر لكل مكان للنظام.

$$\Sigma \ Z_i \ \overline{C}i + \omega x = 0 \qquad - 5$$

حيث X - تركيز الشحنات الثابتة، ω - تشير إلى الشحنة الثابتة، (1 -)- للمبادل الكاتيونى، (1+) - للمبادل الأنيونى .

ويتناسب معدل الحركة (b) لثقل سائل المسام (معدل الحمل) للقوى المؤثرة من المجال الكهربي على حجم عنصر سائل المسام: وعامل التناسب مقاومة المقاومة النوعية لمرور المواد. وفيض الشحنة الكهربية لكل وحدة حجم السائل المسام هو wfx/E – بحيث لا يشمل حجم الشبكية، $\in$ – كسر الحجم للمسام. إذا معدل الحمل :

$$b = \frac{wfx}{p_o \in} \ grad \ \ \varphi = \omega \overline{U}_o \ grad \ \varphi \qquad - 6$$

حيث P_o – مقاومة التيار النوعي للمبادل الأيوني.

النوعية: تعنى أن P_o - مقاومة المرور لكل وحدة حجم للمواد، والمقاومة النوعية ليست صفة ثابتة في المبادل الأيوني. ولكن تعتمد قيمته على الشكل البنائي وقطر المسام، لزوجة السائل، الشكل الأيوني، طبيعة المذيب، الحرارة التركيز... وهكذا، $-\overline{U}_o$ تعرف بالتحركية، القابلية التحركية.

بربط المعادلة (3) بالمعادلة (6) تعطى علاقة شدة كثافة التيار (I) في المقطع العرضي في اتجاه التيار.

$$I = - \ f(\Sigma \ z_i^2 \ \overline{V}_i \ \overline{C}_i + \overline{V}_o \ x) \ grad \ \ \varphi \qquad - 7$$

لاحظ أن الوحدات المستخدمة يجب ثباتها. ولو عبرنا عن شدة التيار وشدة المجال بوحدات التيار، فإن التعريف للتحركية المستخدمة هي المعدل للحركة عند وحدة قوة كهرباء.

وبالنسبة للموصلية النوعية $\overline{K}$ (الاتصالية لوحدة الحجم للمواد).

$$\overline{K} = -\frac{1}{grad\ \varphi} = f(\sum\ Z_i^2\ \overline{V}_i\ \overline{C}_i + V_i\ x) \qquad - 8$$

والمقطع الثاني من المعادلة **(8)** إنما يعود إلى اتصالية الحمل، واتصالية الحمل K_O ومساهمته الكسرية فى إجمالي الموصلية هو :

$$\overline{k}_o = \overline{V}_o\ f\ x \qquad - 9$$

وبقسمة 8 على 9 :

$$\frac{\overline{K}_o}{\overline{K}} = -\frac{\overline{V}_o\ x}{\sum_i\ Z_i^2\ \overline{V}_i \overline{C}_i + \overline{V}_o} \qquad - 10$$

وتزداد العلاقة المهمة لاتصالية الحمل مع النسبة U_O / U_i ، U_O – تتناسب مع تركيز المجموعات الأيونية الثابتة، وعكسيا مع مقاومة المرور (الانسياب). والمعادلة **(6)** – تعتبر مهمة عند سعة عالية للمبادلات مع مقاومة انسياب بطيئة. والمعادلة **(10)**- تكافؤات أيونية عالية وامتصاص اليكتروليتى يختزل المساعدة النسبية لاتصالية الحمل، ومهما يكن مقاومة بطيئة للتيار يصاحبها تحرك أيونى عال. وتحركية أيونية عالية لأيون عالي التكافؤ التركيز العالى للمجموعات الثابتة، يؤدى لمقاومة سريان عالية، (انسياب).

وأعداد الحمل t_i – يمكن إيجادها باستخدام المعادلة **(6 , 3)** ليعطيا :

$$J_i = -\overline{C}_i\ (\ z_i\ u_i - w\ u_o\ )\ grad\ \varphi \qquad - 11$$

والحل هو :

$$\bar{t}_i = \frac{\Im\ J_i}{I} = \frac{\overline{C}_i\ (z_i\ u_i\ - w\bar{u}_o)}{\sum_i\ z_i^2\ u_i\ \overline{C}_i + \bar{u}_o x} \qquad - 12$$

وتتضمن المعادلات **8** ، **9** ، **12** التحركية الأيونية $\overline{V}_i$ i. والمقادير $\overline{V}_o$ (أو P_o) ما زالت غير معلومة، ويمكن حسابهم من قياسات مستقلة لو الموصلية وموصلية الحمل وأعداد الحمل تمت الإشارة إليهم. وفى الأنظمة

الميثالية، التحركية الكهروكيميائية u_i، تعتبر متعلقة بمعامل الانتشار الذاتي D_i بواسطة :

$$u_i = \frac{\Im}{RT} D_i \qquad - 13$$

وفى المبادلات الأيونية. هذه العلاقة تعرف بعلاقة نيرنست أنيشتاين، وبواسطة هذه العلاقة الأخيرة التحركية u_i يمكن حسابها من قياسات الانتشار الذاتية. وكما أن التعيين المستقل للمقدار P_o – المقاومة النوعية للتيار. وبالنسبة للمبادلات الأيونية في الحبيبة لا توجد طرق أجريت ومهما يكن، فالمقادير u_o ، P_o يمكن حسابهما من قياسات سماحية الغشاء الهيدروديناميكى والإليكترو أسموزيز. وبالنسبة للأغراض المعملية "تقدير جزافى " والمقاومة النوعية للتيار لراتنجات التبادل الأيوني الشائعة لها رتبة 10^{12} إلى 10^{14} جرام/ سم$^{-3}$ ثانية$^{-1}$.

طرق معملية :

الموصلية النوعية لمواد التبادل الأيوني من السهل تعيينها،وموصلية الحمل لا نستطيع قياسها مباشرة. إلا أنه يمكن حسابها إما من خلال الموصلية، ومعطيات الانتشار الذاتية أو من تعيين مقاومة التيار. وعلى العموم بعض من تلك القياسات سوف نذكرها فيما بعد مثل مقاومة السريان، أعداد الحمل، أعداد الانتقال.

وأفضل المعطيات الدقيقة للموصلية هي عند استخدام المبادل الأيوني على هيئة أقطاب ومقاومة تلك المواد يمكن قياسها في خلية مزودة بأقطاب بلاتينية أو نحاس– برونز ومتصلة مباشرة مع المبادل الأيوني – شكل (5) – والتقنية هي ربط الغشاء بين محلولين لهما نفس التركيب المشابه، وقياس المقاومة بين القطبين المغموسين في المحلول – شكل (6) وتقاس المقاومة عادة بواسطة دائرة القنطرة المترية العادية – شكل (7). والدراسة الأكثر تفصيلية لدائرة موصوفة بواسطة **Shedlowsky**. وطبقا للقاعدة تجرى القياسات بتردد **1000** دورة.

وفى قياسات الأقطاب بالاتصال المباشر مع المبادل الأيوني، الاتصالية النوعية k يمكن حسابها من المقاومة CR، المقطع العرضي q للقطب الإسطوانى أو الشريحة والمسافة (i) بين الأقطاب.

$$\overline{K} = \frac{l}{R\ q} \qquad - 14$$

وتم الحصول على نتائج دقيقة بواسطة فرق القياسات مع تغير المسافات بين الأقطاب. والخطأ هنا إنما يعود إلى مقاومة السطح المتصل ويحذف مباشرة .

$$\overline{K} = \frac{\Delta l}{\Delta R\ q} \qquad - 15$$

حيث $\Delta \ell$ المسافة المتغيرة بين الأقطاب، (ΔR) - فرق قياس المقاومة بأقطاب والتي تتصل مباشرة للمواد المحضرة المذابة جزئيا للمبادلات الأيونية والقياسات تتم بأقطاب مغموسة في محلول على جانبي المبادل الأيوني كأغشية تعطى المقاومة الكلية R_C للخلية. وهذه المقاومة عبارة عن مجموع للمقاومة الكلية R_O ومقاومة الغشاء. و يمكن تعيين مقاومة المحلول بدون أغشية ليكون أكثر ملائمة، والاتصالية النوعية لمواد الغشاء هي :

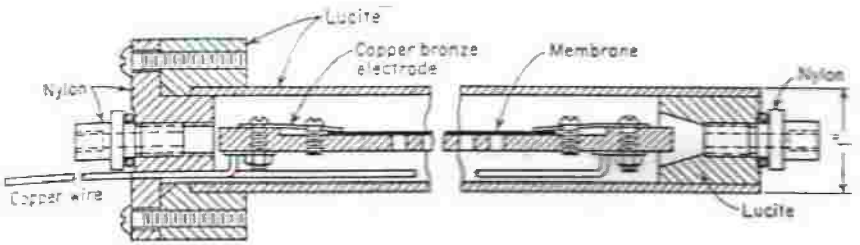
$$\overline{K} = \frac{d}{q}\,(R_c - R_o) \qquad - 16$$

حيث **d-** سماكة الغشاء، **q-** المقطع العرضي للغشاء. وأي خطأ إنما يعود إلى مقاومة اتصال السطح الذى يطرح من هذه التقنية، والتقنية الدقيقة إنما تعتمد على تعيين الفرق بين المقاومتين $(R_C\ ,\ R_O)$ بالمقارنة لهذا الفرق ربما يكون صغيرا وخصوصا لو أن المبادل جيد الاتصال، والمحلول مخفف جدا. والمعوقات يمكن لنا تفاديها بالمحاولات التقنية. والتيار المباشر الثابت للشدة (i) المار خلال القطب أو الشرائح لمواد التبادل الأيوني المقيد بين محلولين متشابهين، والاتصالية النوعية تحسب من فرق الجهد الكهربي $\Delta\ \varphi$ بالفولت بين القطبين المقترحين .

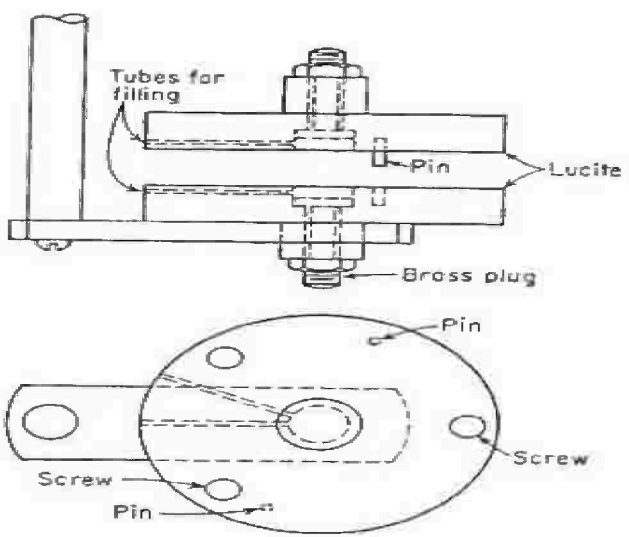
$$R = \frac{i\,l}{\Delta\varphi\ \ q} \qquad - 17$$

في معظم الحالات المبادل الأيوني لا يمكن تحضيره على هيئة قطب أو شريحة أو أغشية وهنا فالمقاومة لحبيبة التبادل الأيوني يجب قياسها.

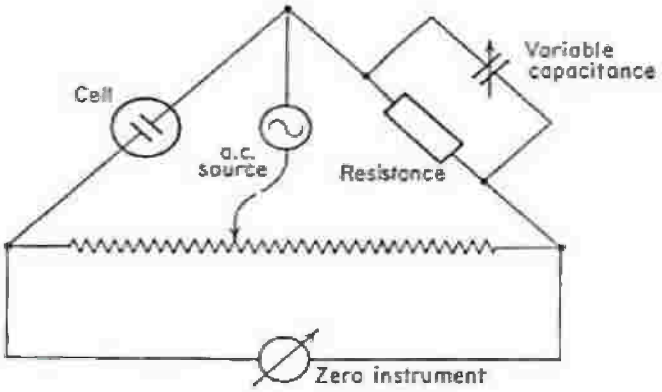
والقياسات ذاتها لحساب الاتصالية النوعية تعتبر مشكلة، وحتى الآن لم تحل. وقيمة صحيحة يمكن تعيينها للموصلية النوعية عند نقطة تساوى الاتصالية حيث الاتصالية النوعية للمبادل والمحلول واحدة ومتساوية. وعموما تلك الطريقة تعطى معلومات وصفية ويمكن استخدامها لتعطى قيم مناسبة.



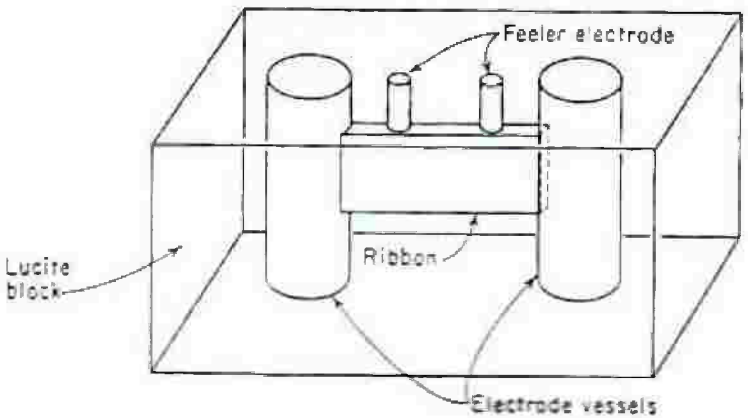
شكل (5): خلية لقياس الموصيلية الكهربية للمبادل الأيوني. حيث المبادل الأيوني على هيئة قطب أو شريط مقيد بين قطبين من أقطاب نحاس – نحاس أصفر برونز. والخلية ربما تغسل بماء باستمرار أو محلول مخفف. والمسافة حوالي 5 بوصة.



شكل (6): خلية لقياس الموصيلية الكهربية لأغشية التبادل الأيوني بأقطاب ليست متصلة بالغشاء. والخلية متصلة بقطب مقلب في المحلول المتزن.



شكل (7): قنطرة مترية لقياس الموصيلية.



شكل (8) : خلية لقياس الموصيلية الكهربية لأغشية التبادل الأيوني بأقطاب ليست متصلة بالغشاء . والخلية متصلة بقطب مقلب في المحلول المتزن .

❖❖❖ ❖❖❖ ❖❖❖