

الكيمياء الكهربائية

١ - مقدمة :

تهتم الكيمياء الكهربائية بدراسة العلاقة بين الظواهر الكهربائية والظواهر الكيميائية ، ومن أهمها العمليات الحاصلة على سطوح المساري لدى مرور التيار الكهربائي في المحاليل الكهرليتيّة . للكيمياء الكهربائية أهمية نظريّة وعملية كبيرة في المجالات الصناعية ، وفي الحصول على العديد من المواد الكيميائية والمعادن النادرة .

٢ - الناقلية الإلكترونية المعدنية :

عرف التيار الكهربائي منذ زمن بعيد بأنه انتقال للإلكترونات عبر المعدن . بالنسبة للمعادن تبقى الإلكترونات في الطبقات الداخلية للذرة مرتبطة مع النواة في حين أن إلكترونات أو أكثر من الطبقة الخارجية يكون واقعاً في منطقة الطاقة العليا نسبياً ويكون مشتركاً مع جميع ذرات المعدن في الناقل ، هذه الإلكترونات الناقلة للتيار الكهربائي تكون حرة الحركة خلال كتلة المعدن بتأثير الحقل الكهربائي المؤثر على عكس النوى التي تبقى في أماكنها . فمن أجل كل إلكترون يغادر المعدن من أحد طرفيه يدخل إلكترونات أخرى من الطرف الآخر . ندعى الناقلية من هذا النوع بالناقلية الإلكترونية أو المعدنية وفي هذه الحالة لا تتغير خواص المعدن لدى نقله التيار الكهربائي .

٣ - الناقلية الكهربائية للمحاليل الكهرليتيّة :

وجد أن المحاليل الناتجة عن انحلال بعض المواد الكيميائية في الماء تكون ناقلة للتيار الكهربائي ومثال عليها محاليل الحموض والأملاح ، وهنا

يتم نقل التيار الكهربائي بواسطة الشوارد الموجبة والسالبة الموجودة في المحلول . علماً أنه توجد بعض المحاليل تنقل التيار الكهربائي بواسطة شحنة وحيدة كالشرجبات في $AgCl$ والشرسبات في $BaCl_2$. كما توجد بعض المواد الصلبة كـ $AgCl$ و ZnO و Cu_2O تملك ناقلية شاردية معدنية مختلطة. تشكل ناقلية المحاليل مقداراً صغيراً بمقارنتها مع ناقلية المعادن ، وتعتبر ناقليتها كبيرة إذا قورنت بناقلية المواد العازلة .

تزداد ناقلية المحاليل بازدياد درجة الحرارة بينما تتناقص ناقلية المعدن بارتفاع درجة الحرارة . أيضاً إن عملية نقل التيار بواسطة المعادن لا تؤثر على المعدن نفسه ، حيث يمكن لسلك نحاسي أن ينقل التيار لعشرات السنين دون أن يؤثر ذلك على قوامه ، بينما تعاني المحاليل من تغيرات حادة عند مرور التيار الكهربائي فيها حيث تحصل فيها عمليات كيميائية قد تؤدي إلى انحلال أو تشكل مواد كيميائية أو انطلاق للغازات .

عند حل ملح كلور الصوديوم $NaCl$ في الماء تتحطم الشبكة البلورية للملح فتتفصل الذرات عن بعضها البعض وتحاط هذه الذرات بجزيئات الماء ويتم تشكيل شوارد موجبة Na^+ وسالبة من Cl^- . وتكون مجموع الشحنات الموجبة والسالبة متساوية وهذا يعطي للمحلول صفة الاعتدال الكهربائي .

٤ - الخواص التجمعية للمحاليل الكهليلتية :

لاحظ العالم راؤول عام 1884 أن انخفاض نقطة التجمد لمحلول $NaCl$ المائي أكبر بمرتين من مقدار الانخفاض المتوقع عند حساب مولية المحلول . فعند تحضير محلول مولي من $NaCl$ بإذابة 58.5 غرام من الملح في 1000 غرام ماء فـالمتوقع أن تنخفض نقطة التجمد بمقدار $1.86^\circ C$ تحت درجة تجمد الماء النقي . لكن نتائج القياس التجريبية تبين أن نقطة التجمد هي $-3.37^\circ C$. مثال آخر : تكون نقطة تجمد محلول $ZnCl_2$ أكبر من نقطة التجمد المحسوبة عن طريق موليته بثلاث مرات . وكلما كان المحلول أكثر تمديداً كان الانخفاض

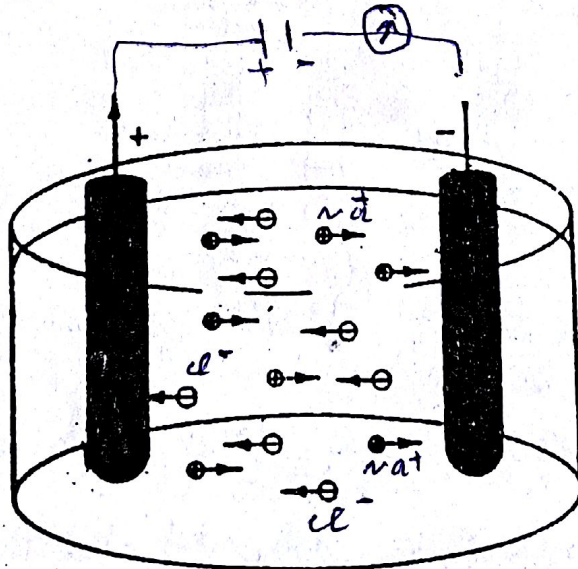
الفعلي لدرجة التجمد أكبر بـ (2-3) مرات من القيم المحسوبة ، وهذا أدى إلى ضرورة استخدام عامل تصحيح سمي بمعامل فانت هوف .

وقد تم إيجاد حالات مشابهة لانخفاض نقطة التجمد حيث توجد حالات تجمعية للمحاليل الكهربية في ارتفاع نقطة الغليان و تناقص ضغط الغاز وفي كل الحالات تستخدم عوامل تصحيح .

عند حل ملح الطعام في الماء توجد شوارد Na^+ و Cl^- وليست جزيئات $NaCl$ وعند حل $ZnCl_2$ تتواجد الشوارد Zn^{2+} و Cl^- وليست الجزيئات $ZnCl_2$ لذلك نضرب الخواص التجمعية بالمعامل 2 و 3 .
 $ZnCl_2 \rightarrow Zn^{2+} + 2Cl^-$
 وعند حل الملح $MgSO_4$ تتشكل الشوارد Mg^{2+} و SO_4^{2-} لذلك نضرب بالمعامل 2 وليس بـ (6) عدد الذرات الموجودة في الجزيئة .
 هـ - الناقلية الشاردية :

عملية نقل التيار الكهربائي في المحاليل الكهربية تتم بواسطة الشوارد الموجودة في المحلول .

لنأخذ محلول (HCl) المائي ونطبق عليه حقل كهربائي ويتم ذلك بوضع مسريين من البلاطين أو الغرافيت ومن ثم وصل هذين المسريين إلى منبع للتيار الكهربائي عبر مقياس أمبير . نلاحظ أن المقياس يشير إلى مرور تيار كهربائي في المحلول .



حركة الشوارد في المحلول لدى تطبيق الحقل الكهربائي

إن المسرى الموصول بالقطب الموجب للمنبع الكهربائي سوف يشحن بشحنة موجبة وتزداد قيمة هذه الشحنة بالقيمة المطلقة. ، أما المسرى الموصول بالقطب السالب فسوف يشحن بشحنة سالبة . تتحرك الشوارد الموجبة H^+ الموجودة في المحلول بتأثير الحقل الكهربائي نحو المسرى السالب بينما تتحرك الشوارد السالبة Cl^- باتجاه المسرى الموجب ، هذه الحركة تؤدي إلى مرور التيار الكهربائي .

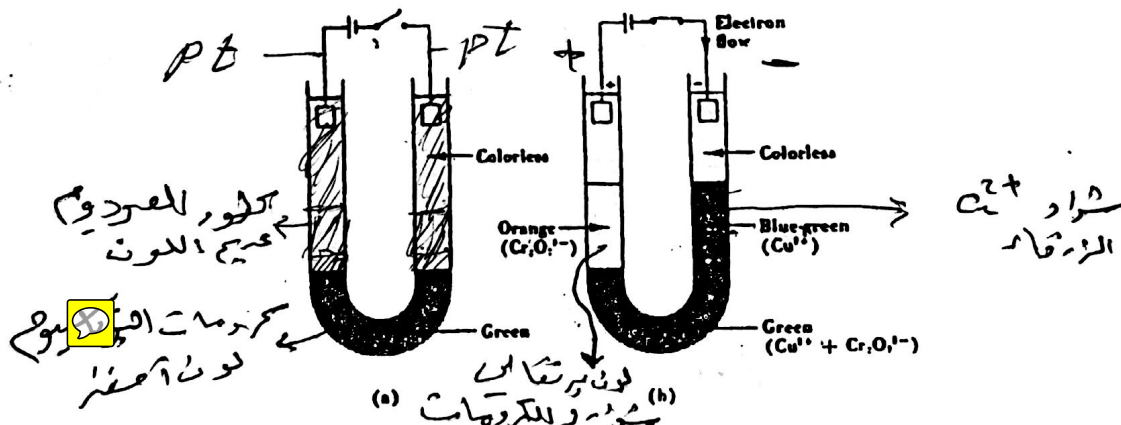
تكون العناصر المتحركة في الناقلة المعدنية هي الإلكترونات السالبة فقط ، بينما في المحاليل الكهرليتيّة تسهم الشوارد من كلا النوعين بعملية نقل التيار الكهربائي، ويكون دور الشوارد الموجبة باتجاه ما مكملًا لدور الشوارد السالبة بالاتجاه الآخر .

ويقال في هذه الحالة أن المعدن يحتوي على ناقلات للتيار من شحنة واحدة ، بينما يحتوي المحلول على ناقلات للتيار من نوعين من الشحنات .

الواقع التجريبي يدل على أن زيادة درجة حرارة المحلول الكهرليتي يزيّد الناقلة. لأن درجة الحرارة تعمل على خفض لزوجة الوسط وبالتالي تسهل حركة الشوارد في المحلول .

عملية نقل التيار الكهربائي بواسطة الكهرليات تترافق بانتقال المادة :

نبين ذلك بالتجربة التالية :



a- قبل إمرار التيار الكهربائي في المحلول تكون الشوارد الملونة في أسفل الأنبوب .

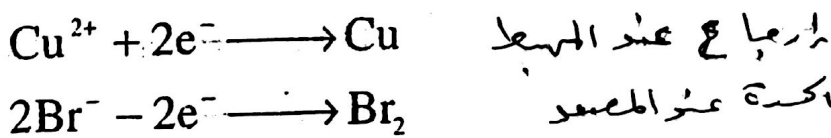
b- بعد مرور التيار الكهربائي لمدة من الزمن . تتحرك شوارد النحاس (ذات اللون

الأزرق المخضر) نحو أحد المسربين وشوارد الكرومات البرتقالية نحو الآخر

نأخذ أنبوباً زجاجياً على شكل حرف U ، ثم نضع فيه محلولاً من ثاني كرومات النحاس CuCr_2O_7 ذي اللون الأخضر ، ثم يضاف في طرفي الأنبوب محلول كلور الصوديوم العديم اللون . وتتخذ الإجراءات اللازمة لتجنب مزج المحلولين مع بعضهما البعض قدر الإمكان . توضع في طرفي الأنبوب مساري بلاتينية وتوصل هذه المساري إلى منبع للتيار الكهربائي ومن ثم تغلق الدارة الكهربائية .

بعد فترة من زمن مرور التيار الكهربائي يظهر لون أزرق مخضر في طرف الأنبوب الموصول مع القطب السالب ، وهذا اللون ناتج عن تجمع شوارد النحاس . بينما يظهر لنا لون برتقالي في طرف الأنبوب الموصول مع القطب الموجب وهو ناتج عن تجمع شوارد الكرومات Cr_2O_7^- حول المسرى الموجب إن محلول ثاني كرومات النحاس يحتوي على شاردتين هما Cu^{2+} و $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ تقومان بنقل التيار الكهربائي . وعند وصول الشحنات إلى سطوح المساري تنتهي رحلتهم في المحلول .

عند تحليل محلول من CuBr_2 يتشكل البروم الأحمر عند القطب الموجب ويكون لونه أحمر (على شكل غاز أو سائل) ، بينما يترسب النحاس على المسرى السالب وخلال العملية تحدث التفاعلات التالية :



وكما يبدو أن التفاعل الحاصل عند المسرى السالب هو تفاعل إرجاع والتفاعل الحاصل عند المسرى الموجب هو تفاعل أكسدة .

٦- وعاء التحليل الكهربائي وعملية التحليل الكهربائي :

نتيجة لمرور التيار الكهربائي في محلول كيميائي سوف نحصل على مواد أبسط من المحاليل نفسها . فمثلاً لدى مرور التيار الكهربائي في محلول HCl نحصل على غاز الكلور وغاز الهيدروجين . تسمى هذه العملية بعملية التحليل

الكهربائي ويسمى الوعاء الذي تحصل فيه بوعاء التحليل الكهربائي . يمكننا عملية التحليل الكهربائي من الحصول على مواد عالية النقاوة ، في جميع عمليات التحليل الكهربائي نجد أن الماء هو أحد مكونات المحلول ، لذلك نجد دائماً كميات قليلة من شوارد الهيدروجين والهيدروكسيل الناتجة عن التشرذ الضعيف للماء بالإضافة إلى الشوارد الموجبة والسالبة للمادة المنحلة .



شوارد المادة + H^+ + OH^-

لدينا في وعاء التحليل مزيج من الشوارد هذه الشوارد تتجه إلى المساري من أجل تعديل شحناتها . والعوامل التي تتحكم بتعديل شاردة قبل أخرى عديدة ومنها تركيز الكهرليت وطبيعة الشاردة ومعدن المسرى إضافة إلى عوامل أخرى . وكلما انخفض كمون تشرذ المعدن كان تعديل شوارده عند المسرى السالب أكثر صعوبة وبالتالي يتم تعديل شوارد الهيدروجين H^+ أولاً بدلاً من شوارد المعدن . وفي حال احتواء الشاردة السالبة للمادة المذابة على الأكسجين مثلاً $(\text{NO}_3^-, \text{SO}_4^{2-})$ فإن شوارد الهيدروكسيل OH^- تعدل شحناتها أولاً عند المسرى الموجب .

يستخدم في عمليات التحليل الكهربائي نوعان من المساري نوع لا يشارك في التفاعلات الكيميائية الحاصلة في المحلول الكهرليتي . ونوع آخر من المساري يشارك في التفاعلات وتحصل عليه تفاعلات إرجاع أو أكسدة أو كلاهما .

٧- تطبيقات على عملية التحليل الكهربائي :

٧-١- التحليل الكهربائي لمصاهير الأملاح :

عند انصهار البلورات الشاردية تتحول إلى سائل من الشوارد تتمتع بقدرة كبيرة على الحركة مقارنة بحركتها داخل البلورات الصلبة . وتستطيع هذه الشوارد وبفعل تأثير الحقل الكهربائي الخارجي أن تتحرك مما يعطي لهذه المصاهير صفة نقل التيار الكهربائي .

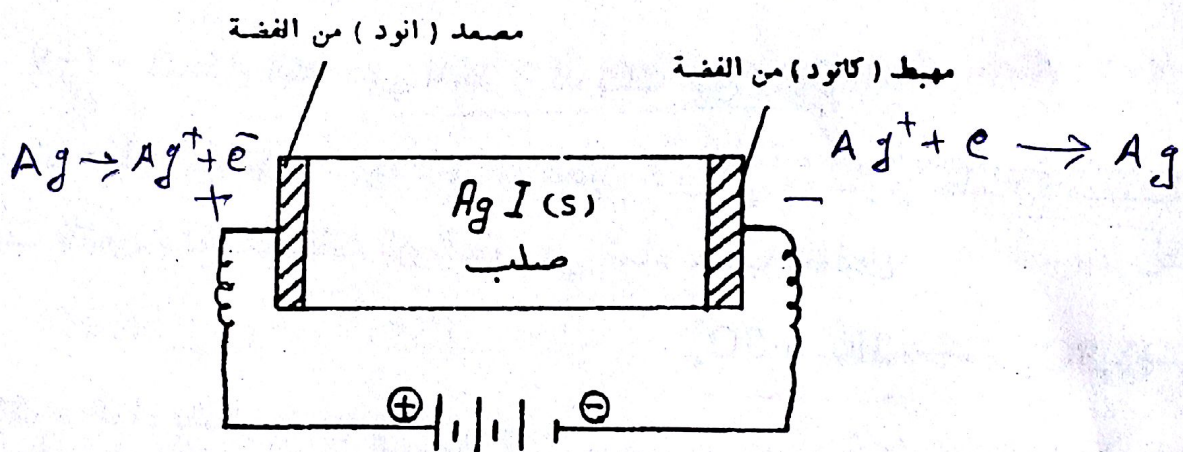
البلورات الشاردية الصلبة تمتلك ناقلية كهربائية محسوسة وخاصة في درجات الحرارة العالية وهذا يشير إلى إمكانية حركة وهجرة الشوارد في مجال محدد ضمن الحالة الصلبة .

يمتلك ملح AgI الصلب ناقليته $1(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$ عند الدرجة 150°C وهي تقارب قيمة ناقليته في المحاليل الكهرليئية .

عند وصل يود الفضة الصلب مع منبع للتيار الكهربائي ، يحصل عند القطب السالب (مهبط أو مهبط) تفاعل إرجاع تترسب بنتيجته الفضة على المسرى

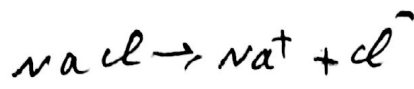


بينما يحصل عند القطب الموجب (مصعد أو مصعد) تفاعل أكسدة يتم فيه انحلال الفضة :

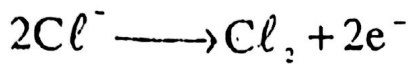


عند مرور كمية محددة من الكهرباء يمكننا التأكد من أن كمية الفضة المنحلة عند المصعد تساوي كمية الفضة المترسبة عند المهبط ، ويفسر ذلك بحركة شوارد الفضة داخل الملح الصلب ، وامتلاكه نتيجة لذلك ناقلية كهربائية كبيرة نسبياً .

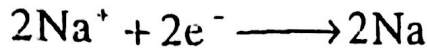
في حالة الأملاح المصهورة ، تصبح التفاعلات المستحيلة بوجود الماء ممكنة بحالة الملح المصهور ، ونعرف بأن المعادن القلوية الترابية يتم استحصالها الآن بواسطة التحليل الكهربائي لمصاهير أملاحها ، ففي حالة كلور الصوديوم تحدث



في وعاء التحليل الكهربائي العمليات التالية :



عند المصعد



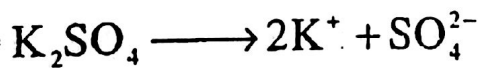
عند المهبط

أما في حال تمت عملية التحليل الكهربائي لمحلول $NaCl$ في الماء بدلاً من مصهور $NaCl$ فإن الناتج سوف يكون غاز (H_2) عوضاً عن (Na) . مع العلم أنه يمكن الحصول على الصوديوم من التحليل الكهربائي لمالح الطعام باستخدام مهبط من الزئبق ينحل فيه الصوديوم ، لأن تحرر H_2 على سطح الزئبق يكون صعباً جداً بسبب ارتفاع قيمه فوق الكمون ، بعد ذلك يمكن الحصول على الصوديوم من الملعمة بطرق عدة .

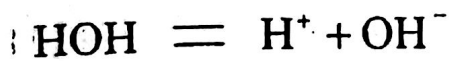
يستحصل الألمنيوم أيضاً بالتحليل الكهربائي لمصهور Al_2O_3 المنحل في الكريوليت في الدرجة $1000^\circ C$ ، وهي الطريقة الصناعية الأساسية للحصول على معدن الألمنيوم في العالم .

٧-٢ - التحليل الكهربائي لمحلول كبريتات البوتاسيوم :

تتم عملية التحليل باستخدام وعاء تحليل كهربائي ومساري خاملة كيميائياً ، حيث يتشرد ملح كبريتات البوتاسيوم في الماء حسب التفاعل :



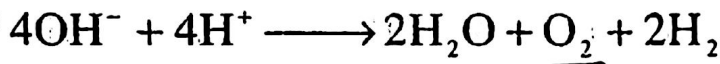
ويتشرد الماء بشكل ضعيف



تتجه الشوارد الموجبة K^+ و H^+ نحو المسرى السالب حيث يتم تعديل شوارد الهيدروجين أولاً وذلك لأن كمون تشرد البوتاسيوم أخفض من كمون تشرد الهيدروجين . وتتجه الشوارد السالبة OH^- و SO_4^{2-} نحو المسرى الموجب حيث يتم تعديل شوارد OH^- أولاً ، ويمكن كتابة التفاعلات الحاصلة :

مصعد	مهبط
$\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow$ لا تعادل	$2\text{K}^+ \longrightarrow$ لا تعادل
$2\text{OH}^- \longrightarrow 2\text{O}'\text{H} + 2\text{e}^-$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}'$
$2\text{O}'\text{H} \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}'$	$2\text{H}' \longrightarrow \text{H}_2$
$\text{O}' \longrightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2$	
$2\text{OH}^- \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2$
$4\text{OH}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$	$4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \longrightarrow 2\text{H}_2$

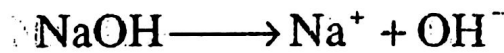
والتفاعل الكلي الحاصل في وعاء التحليل :



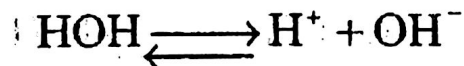
وكان العملية هي عملية تحليل للماء إلى عنصريه الهيدروجين والأكسجين .

٧-٣- التحليل الكهربائي لهيدروكسيد الصوديوم :

يستخدم في العملية وعاء تحليل كهربائي ومساري خاملة كيميائياً :



تفاعل تشتت ماءات الصوديوم



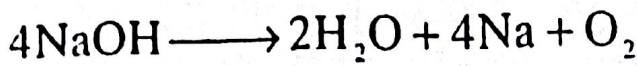
ويتشتت الماء بشكل ضعيف

يتم تعديل شوارد Na^+ أولاً عند المهبط ويتشكل الصوديوم Na ، بينما يتم تعديل

شوارد الهيدروكسيل OH^- أولاً عند المصعد .

التفاعل عند المصعد	التفاعل عند المهبط
$4\text{OH}^- \longrightarrow 4\text{O}'\text{H} + 4\text{e}^-$	$4\text{Na}^+ + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{Na}$
$4\text{O}'\text{H} \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{O}'$	
$2\text{O}' \longrightarrow \text{O}_2$	
$4\text{OH}^- \longrightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$	$4\text{Na}^+ + 4\text{e}^- \longrightarrow 4\text{Na}$

والتفاعل الكلي :

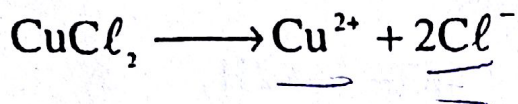


أي ناتج عملية التحليل هو تشكل الصوديوم والأكسجين .

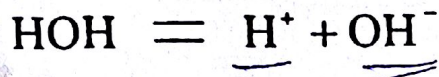
٧-٤ - التحليل الكهربائي لمحلول كلور النحاس :

يستخدم وعاء تحليل كهربائي ومساري خاملة كيميائياً .

يتشرد كلور النحاس حسب التفاعل



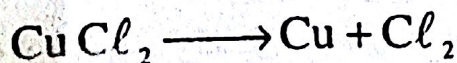
ويتشرد الماء بشكل ضعيف



والتفاعلات الحاصلة في وعاء التحليل .

عند المصعد	عند المهبط
$2\text{Cl}^- \longrightarrow 2\text{Cl}' + 2\text{e}^-$	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$
$2\text{Cl}' \longrightarrow \text{Cl}_2$	
$2\text{Cl}^- \longrightarrow 2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$	$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Cu}$

والتفاعل الإجمالي الحاصل :

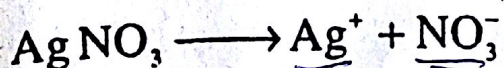


نتيجة التحليل يتشكل لدينا النحاس وغاز الكلور .

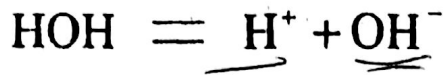
٧-٥ - التحليل الكهربائي لمحلول نترات الفضة : ص - ٥ - ٥

يستخدم وعاء تحليل كهربائي المصعد فيه مؤلف من مادة الفضة .

تتشرد نترات الفضة حسب التفاعل



ويتشرد الماء بشكل ضعيف



تتوجه شوارد الفضة Ag^+ وشوارد الهيدروجين H^+ باتجاه المهبط ويتم تعديل شوارد الفضة أولاً .

بالنسبة للشوارد السالبة OH^- و NO_3^- تتوجه باتجاه المصعد ولكن لا يتم عنده تعديل أي منهما وإنما تحصل عملية أكسدة لمادة المصعد (الفضة) حيث تتحول إلى شوارد داخل المحلول .

والتفاعلات الحاصلة :

عند المصعد	عند المهبط
$\text{Ag} - \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}^+$	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \longrightarrow \text{Ag}$

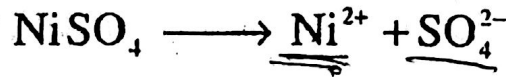
أي بنتيجة عملية التحليل يتم انتقال الفضة من المصعد وترسبها على المهبط .

تستخدم هذه العملية في طلي المعادن بالفضة والذهب وغيرها . ويتم ذلك بجعل المادة المراد طليها مهبطاً في وعاء التحليل .

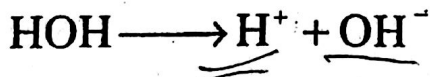
٦-٧ - التحليل الكهربائي لمحلول كبريتات النيكل :

يتم التحليل باستخدام وعاء تحليل كهربائي ومسرى المصعد مصنوع من مادة النيكل .

معادلة تشرّد كبريتات النيكل



معادلة تشرّد الماء بشكل ضعيف



H^+ و Ni^{2+} تتجهان نحو المهبط ويتم إرجاع شوارد النيكل .

OH^- و SO_4^{2-} تتجهان نحو المصعد ولكن لا يتم تعديل أي منهما .

عند المصعد	عند المهبط
$\text{Ni} \longrightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \longrightarrow \text{Ni}$

نتيجة التحليل هو انتقال مادة المصعد (النكل) إلى المهبط وترسبها عليه .

٨- قوانين فاراداي في التحليل الكهربائي :

عند تمرير كمية محددة من الكهرباء في وعاء التحليل الكهربائي سوف يتم تحرير أو انحلال كمية محددة من المواد ، وينص قانون فاراداي الأول على أن كمية المادة المتفككة أو المتشكلة في تفاعل مسروي ما ، تتناسب مع كمية الشحنة المارة في المحلول $q = I \cdot t$.

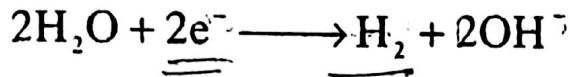
وتبين التجربة أن إمرار فاراداي واحد في أوعية تحليل كهربائية تحتوي على محاليل مختلفة سوف يؤدي إلى ترسب ذرة غرامية واحدة من هذه المواد المختلفة . فمثلاً من أجل محلول الفضة سوف يترسب 107.8 غرام وتتحرر نصف ذرة غرامية من الأكسجين أي 8 غرام ، ومن أجل محلول النحاس سوف يترسب 31.77 غرام من النحاس .

القانون الثاني لفاراداي ينص على أن مرور نفس كمية الشحنة في محاليل كهربائية مختلفة سوف يؤدي إلى تفكيك أو تشكيل نفس العدد من المكافئات الغرامية للمواد المختلفة سواء كان ذلك على شكل راسب أو سائل أو غاز .

إن كتلة المادة المنحلة أو المتشكلة في عملية التحليل لدى مرور فاراداي واحد في المحلول تساوي إلى الوزن الذري للمادة منسوبة إلى تكافؤ العنصر .

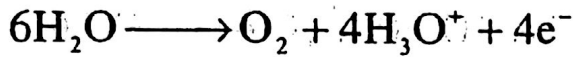
بنتيجة التجربة وجد أن الفاراداي (كمية الشحنة اللازمة لتفكيك أو تشكيل واحد مكافئ غرامي من أي مادة نتيجة التحليل الكهربائي) يساوي إلى 96487 كولون وللتسهيل تستخدم القيمة 96500 . ويساوي الفاراداي أيضاً إلى عدد أفوكادرو من شحنات الإلكترون أو مول واحد من الإلكترونات ، وتدعى كمية المادة الناتجة أو المنحلة بواسطة مرور فاراداي واحد في المحلول بالمكافئ الغرامي للمادة وتقدر بالغرام .

ندرس التفاعل التالي :



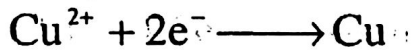
يحتاج إنتاج جزيئة هيدروجينية إلى إلكترونين أي أنه يلزم فاراداي واحد لتشكل نصف مول من الهيدروجين 1 غرام تقريباً ويكون الوزن المكافئ للهيدروجين مساوياً نصف وزنه الجزيئي ، $\frac{1}{2}$

ومن أجل التفاعل :



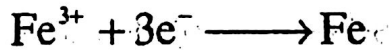
يتم نزع أربع إلكترونات من الأكسجين O_2 أي إلكترونين من كل O ولذلك يكون الوزن المكافئ للأكسجين $\frac{32}{4} = 8 \text{ g}$ أو $\frac{16}{2} = 8 \text{ g}$

وبالنسبة للنحاس :



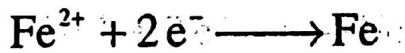
يكون الوزن المكافئ مساوياً نصف وزنه الجزيئي أي $\frac{64}{2} = 32 \text{ g}$

وفي حال شوارد الحديد



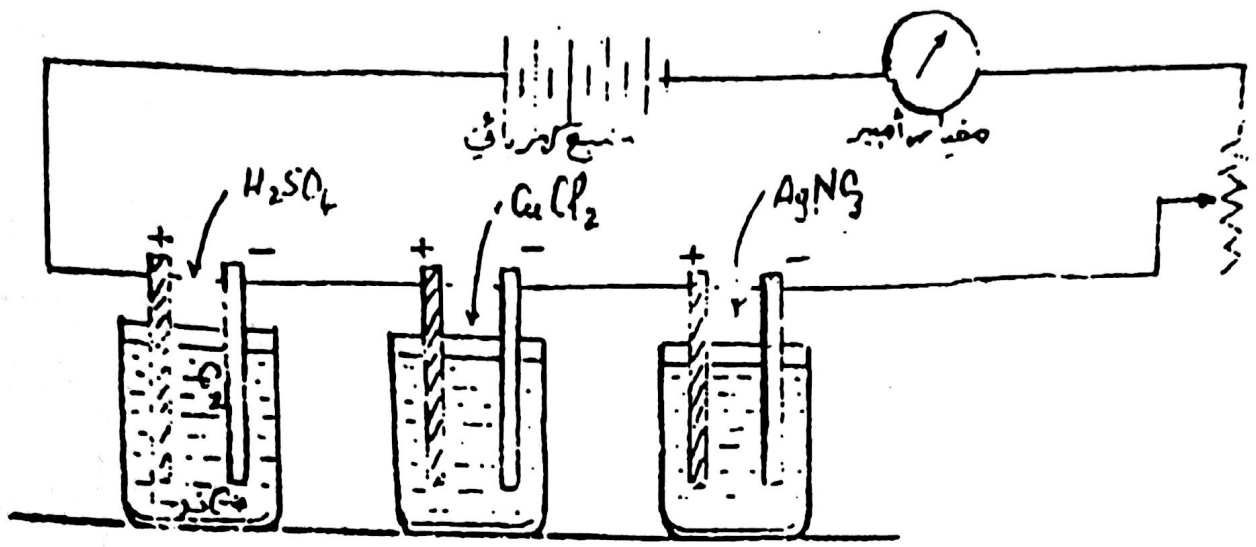
يكون وزنه المكافئ مساوياً $\frac{56}{3} \text{ g}$

وفي حال كانت الشوارد Fe^{2+}



يكون الوزن المكافئ للحديد هنا مساوياً $\frac{56}{2} = 28 \text{ g}$

يمكن توضيح قوانين فاراداي بالتجربة التالية :



نأخذ ثلاثة أوعية تحليل موصولة مع بعضها البعض على التسلسل ، الوعاء الأول يحوي محلول H_2SO_4 والثاني محلول $CuCl_2$ والثالث $AgNO_3$.
نمرر في أوعية التحليل كمية من الكهرباء أو الشحنة تكفي لتشكيل واحد مكافئ غرامي من الهيدروجين أي 1g في الوعاء الحاوي على حمض الكبريت ، ثم نقطع التيار الكهربائي وننظر في النواتج المختلفة لعملية التحليل فنجد ، في الوعاء الحاوي على حمض الكبريت نجد بالإضافة إلى 1g من الهيدروجين يتشكل 1 مكافئ غرامي من الأكسجين أي 8g . وفي وعاء نترات الفضة $AgNO_3$ يتشكل مكافئ غرامي واحد من الفضة 108g ومكافئ غرامي واحد من الأكسجين أي 8g . وفي وعاء $CuCl_2$ يتشكل مكافئ غرامي من النحاس 32g ومكافئ غرامي واحد من الكلور 36g .

اعتماداً على قوانين فاراداي وُجِدَ أن كمية الشحنة المارة في المحلول ترتبط مع كمية المادة المتفككة أو المتشكلة في وعاء التحليل بالعلاقة التالية :

$$g = \frac{I \cdot t \cdot m}{F} = \frac{I \cdot t \cdot m}{96500}$$

- g كمية المادة المتفككة أو المتشكلة بالغرام .
- I شدة التيار المار في المحلول ويقاس بالأمبير .
- t زمن مرور التيار الكهربائي بالثانية .
- m الوزن المكافئ الغرامي للمادة المتفككة أو المتشكلة .
- F عدد فاراداي ويساوي 96500 كولون .

٨-١- تطبيقات على قانون فاراداي :

مثال 1 :

يمرر 0.2 فاراداي عبر ثلاثة أوعية تحليل موصولة على التسلسل . الوعاء الأول يحتوي على شاردة الفضة والوعاء الثاني يحوي شاردة النحاس والوعاء الثالث يحتوي على شاردة الحديد .

بفرض أن التفاعل عند المهبط في كل وعاء هو تفاعل إرجاع الشاردة إلى معدن، احسب عدد الغرامات من كل معدن المترسبة على المهبط .

من كل مادة يترسب 1 مكافئ غرامي عند مرور 1 فاراداي في المحلول .

من كل مادة يترسب 0.2 مكافئ غرامي عند مرور 0.2 فاراداي في المحلول .

كمية المادة المترسبة = الوزن المكافئ × عدد المكافئات الغرامية المترسبة

$$107.9 \times 0.2 = 21.58 \text{ g} \quad \text{كمية الفضة بالغرام}$$

$$32.68 \times 0.2 = 6.54 \text{ g} \quad \text{كمية النحاس بالغرام}$$

$$18.63 \times 0.2 = 3.3 \text{ g} \quad \text{كمية الحديد بالغرام}$$

مثال 2 :

لدى مرور تيار كهربائي في محلول ممدد من حمض الكبريت (باستخدام مساري خاملة) ولمدة ساعة واحدة يتحرر حجماً قدره 336 ml من الهيدروجين مقاسة في الشروط النظامية . والمطلوب حساب شدة التيار الكهربائي .

كل 1 F يحرر مكافئ غرامي واحد من الأكسجين أي (8 g) ومكافئ غرامي

من الهيدروجين (1 g) . أي أن مرور واحد فاراداي في المحلول يحرر $\frac{1}{4}$

جزيء من O_2 و $\frac{1}{2}$ جزيء من H_2 ، ويكون حجم المزيج المتشكل هو $\frac{3}{4}$

جزيئة غرامية من الغازين .

حجم واحد جزيء غرامي في الشروط القياسية هو 22.4 L

حجم $\frac{3}{4}$ جزيء غرامي في الشروط القياسية هو x

$$x = \frac{3}{4} \times 22.4 = 16.8 \text{ L}$$

عند مرور 96500 كولون في المحلول يتحرر 16.8 L من (O₂ + H₂)

$$0.336 \text{ L}$$

y

$$q = y = \frac{96500 \times 0.336}{16.8}$$

كمية الشحنة خلال ساعة

$$q = I t$$

$$I = \frac{y}{\frac{3600}{60 \times 60}} = \frac{96500 \times 0.336}{16.8 \times 3600}$$

$$I = \frac{q}{t}$$

شدة التيار

مثال 3 :

AuCl₃

مرر تيار شدته 0.5 أمبير في محلول كلور الذهب حتى تم ترسيب 1.2g من الذهب على المهبط . فإذا كان التفاعل المذكور هو التفاعل الوحيد عند المهبط ، وكان التفاعل على المصعد هو تفاعل تحرير الأكسجين . احسب :

أ- عدد مولات O₂ ، ب- الحجم في الشروط النظامية

ج- وزن O₂ المتحرر ، د- عدد الكولونات المارة في الدارة .

هـ- زمن عملية التحليل المذكورة .

يساوي الوزن الذري للذهب 197 g للذرة الغرامية الواحدة .

التفاعل الحاصل على المهبط



$$\frac{197}{3} = 65.67 \text{ g}$$

لذلك فإن الوزن المكافئ للذهب

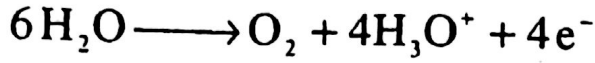
$$\frac{1.2}{65.67} = 0.01827$$

وعدد المكافئات المترسبة

ويكون عدد الفارادات المارة في المحلول هو نفس عدد المكافئات أي

$$0.01827 \text{ F}$$

بالنظر إلى التفاعل



نجد أن مول من O_2 هو أربع مكافئات ، لذلك يكون عدد مولات الأكسجين المتحررة

$$\frac{0.01827}{4} = \underline{0.00457 \text{ mol}}$$

ب- الحجم في الشروط القياسية

$$0.00457 \times 22.4 = 0.102 \text{ L}$$

$$\underline{0.00457} \times \underline{32} = 0.146 \text{ g}$$



ج- الوزن يساوي

د- عدد الكولونات المارة في الدارة بالكولون



$$\underline{0.0187} \times 96500 = 1.76 \times 10^3$$

هـ- زمن مرور التيار الكهربائي

$$q = I \cdot t \Rightarrow t = \frac{q}{I} = \frac{1.76 \times 10^3}{0.5} = \underline{3.52 \times 10^3 \text{ sec}}$$

٩- الناقلية الكهربائية للمحاليل الكهرليتيّة :

تتميز المحاليل الكهرليتيّة بناقليتها الجيدة للتيار الكهربائي ، وتقاس ناقلية المحلول الكهرليتي بقياس المقاومة الكهربائية لعينة من المحلول ذات طول ومقطع محددين .

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

تعطى المقاومة الكهربائية بالعلاقة :

R المقاومة الكهربائية بالأوم ، L طول الناقل بالـ cm ، S سطح المقطع بالـ cm² .

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{L}$$

الناقلية الكهربائية هي مقلوب المقاومة الكهربائية

ρ هي المقاومة النوعية وتقاس بوحدة $\Omega \cdot \text{cm}$.

إن مقلوب المقاومة الكهربائية النوعية يعرف بالناقلية الكهربائية النوعية

$$\chi = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{R \cdot S} \quad \text{الناقلية الكهربائية}$$

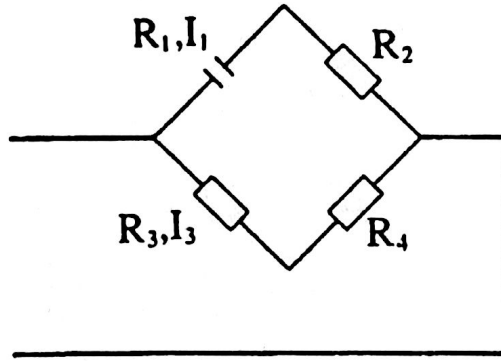
وكما هو واضح فالوحدة هي $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

وتعرف الناقلة النوعية بالنسبة للمحاليل الكهرليتيّة بأنها الناقلية الكهربائية لطبقة من محلول مكعبة الشكل طول ضلعها 1 cm ومحصورة بين مستويين معدنيين متقابلين .

٩-١ - قياس الناقلة الكهربائية للمحاليل الكهرليتيّة :

يمكن قياس الناقلة النوعية الكهربائية للمحاليل باستخدام جسر وطسطون - كيرشوف والذي عندما يكون في وضع التوازن تتحقق فيه العلاقة :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$



من معرفة قيم ثلاث مقاومات يمكن معرفة قيمة R_1 التي يوضع بدلاً منها الخلية، بعد معرفة R_1 المقاومة الكهربائية للمحلول يمكن حساب المقاومة النوعية ومن ثم تحسب الناقلة النوعية :

$$R = \rho \frac{L}{S} \Rightarrow X = \frac{1}{\rho}$$

تمثل L المسافة بين سطحي المسريين المغطيان بطبقة من البلاتين الأسود لمنع

تراكم الغازات (هذا التراكم يؤدي لتغيير قيمة مقاومة الناقل) ويستخدم لمنع الاستقطاب تيار ذو تردد 1000 هرتز .

تسمى النسبة $\frac{L}{S}$ بثابت الخلية ويتعذر قياس قيمة هذا الثابت بدقة كافية لذلك يلجأ إلى وضع كهربي (محلول كلور البوتاسيوم) في خلية ذات ناقلية معلومة ، ومن ثم نحدد النسبة $\frac{L}{S}$ للخلية . بعدها يستبدل هذا الكهربي بآخر نريد قياس ناقليته المجهولة . نقيس مقاومة الخلية الحاوية على الكهربي الجديد مع الأخذ بعين الاعتبار قيمة النسبة $\frac{L}{S}$ وبذلك نستطيع معرفة الناقلية النوعية لأي كهربي .

٩-٢ - الناقلية المكافئة : عَمِلْ صُغْرُوبْ

ناقلية محلول هي الناقلية الموافقة لواحد cm^3 منه (أي حجم طوله 1 cm و سطح مقطعه 1 cm^2) . وتتعلق هذه الناقلية بعدد الشوارد في واحدة الحجم وبالتالي تتعلق بالتركيز المولي للكهربي المدروس . من حيث المبدأ تتناسب الناقلية مع تركيز الكهربي $\chi = C \cdot \text{const}$ وبالتالي $\frac{\chi}{C} = \text{const}$ وهذا صحيح في درجة حرارة معينة .

ندعو المقدار $\lambda = \frac{1000 \times \chi}{C}$ بالناقلية المكافئة للمحلول وتم إدخال العدد 1000

لأن المقدار C هو عبارة عن عدد المولات في 1 cm^3 من المحلول .

تم اللجوء إلى هذا التعريف لأن حسابات الناقلية المكافئة تتضمن تغييرها مع التركيز . وفي هذه الحالة تكون λ منسوبة إلى كمية محددة من المادة .

عند تعريف الناقلية المكافئة لكهربي ، حيث لا تكون الشوارد أحادية الشحنة دوماً ، فإننا نعني بالتركيز C عدد المكافئات في اللتر وليس المولية ، والمكافئ في هذا المجال هو عبارة عن كمية المادة المنحلة التي تعطي في المحلول شوارد موجبة تكافئ فاراداي واحد من الشحنات .

من أجل $NaCl$ يكون المكافئ هو مول واحد ، ومن أجل $CaCl_2$ يكون المكافئ الغرامي عبارة عن نصف مول لأن المول من $CaCl_2$ يعطي مول من شوارد Ca^{2+} والتي شحنتها +2 فاراداي ومولين من Cl^- لكل منها شحنة قدرها (-1) فاراداي .

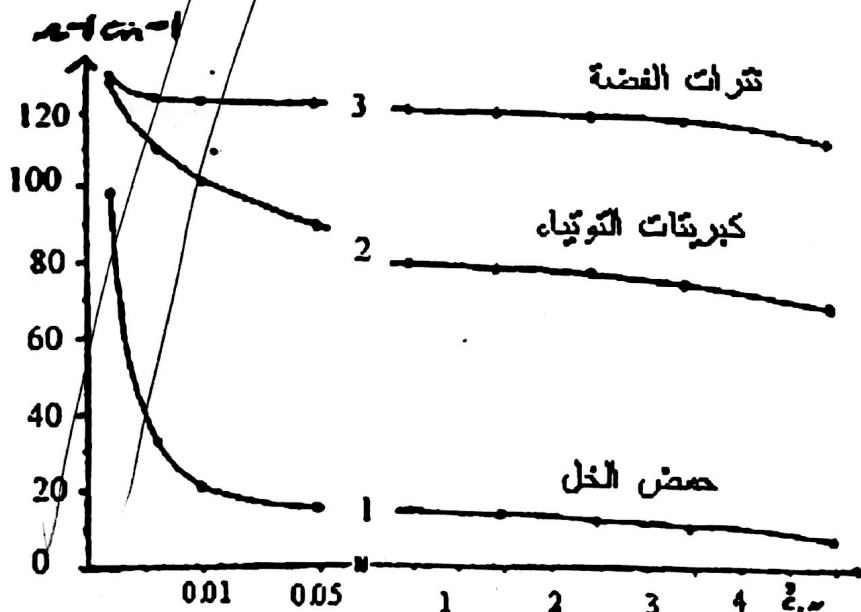
بنفس الطريقة نجد أن الوزن المكافئ لملح $Al_2(SO_4)_3$ عبارة عن $\frac{1}{6}$ من الوزن المولي لهذه الجزيئة .

عبر سلك
٩-٣- العلاقة بين الناقلية الكهربائية المكافئة والتركيز :

العلاقة $\lambda = \frac{1000 \times \chi}{C}$ تبين أن الناقلية الكهربائية المكافئة λ تتناسب عكساً مع التركيز وطرذاً مع الناقلية النوعية .

بشكل عام إن الناقلية الكهربائية النوعية تتناسب طرذاً مع التركيز بالنسبة للكهرليات القوية وذلك حتى تركيز يقترب من N 6 ، أما بعد هذا التركيز فالناقلية النوعية تبدأ بالتناقص .

بالنسبة للكهرليات الضعيفة فإن الناقلية النوعية لا تكاد تتغير وهي صغيرة جداً ولكنها تزداد قليلاً حتى تركيز N (3-4) . لذلك يمكن أن نجد عدم تغير في الناقلية الكهربائية المكافئة λ وعدم تناقصها بازدياد التركيز .



تتناسب الناقلية الكهربائية المكافئة طرداً مع حركة الشوارد أي أن $(U_+ + U_-) \propto \lambda$ حيث U_+ هي حركة الشوارد الموجبة و U_- حركة الشوارد السالبة .

إن الناقلية النوعية تتناسب طرداً مع الناقلية المكافئة وهي بدورها تتناسب مع حركة الشوارد في المحلول ، لذلك يمكن أن نستنتج أن الناقلية النوعية تتناسب طرداً مع حركة الشوارد .

يمكن تفسير علاقة λ مع التركيز بأن الناقلية المكافئة لكهرليت تتحدد بعاملين ، الأول فيهما هو أن ذلك الجزء من الكهرليت الذي يتواجد في المحلول بشكل شوارد ويتعلق بالتركيز ، وثانيهما هو سرعة حركة الشوارد التي تتعلق بدورها بالتركيز .

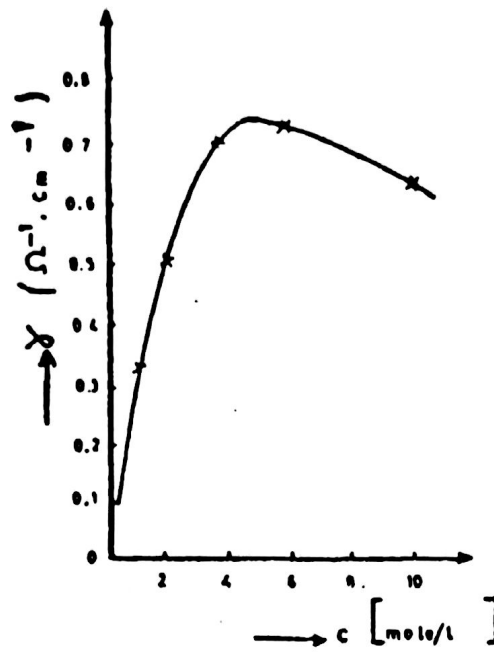
تفسير أرينيوس لهذه الحالة بأن استتباب التوازن في المحلول يعني تشرّد قسم من الكهرليت إلى الشكل الشاردي ، وعند تزايد التركيز ينزاح التوازن في المحلول نحو تشكيل جزيئات غير متشرّدة مع تناقص الشوارد الناقلة للتيار ، وبالتالي تتناقص الناقلية مع C .

بالرغم من انطباق هذه النتيجة مع الحقائق كفيّاً ، فإن هذا التفسير لا يستطيع تعليل النتائج الكمية للتغيرات المذكورة .

٩-٤- تغير الناقلية الكهربائية النوعية مع التركيز :

كما ذكر سابقاً فإن تركيز الشوارد وسرعتها في المحلول يلعب دوراً كبيراً في الناقلية النوعية فـ ناقلية الماء المقطر الضعيفة تزداد بقوة عند حل كهرليت فيه . كذلك فإن الناقلية النوعية تتعلق بدرجة الحرارة والتركيز .

بيّنت النتائج التجريبية أن الناقلية النوعية للمحلول الكهرلتي تزداد بازدياد التركيز حتى نهاية عظمى تبدأ بعدها بالتناقص .



تغير الناقلية الكهربائية النوعية بدلالة التركيز

في المحاليل الممددة والتراكيز الصغيرة لا تتعلق سرعة حركة الشوارد بالتركيز وإنما فقط بدرجة الحرارة وطبيعة الشاردة نفسها لذلك تزداد الناقلية النوعية بشكل طردي مع تزايد التركيز .

في المحاليل المركزة تتناقص سرعة حركة الشوارد في المحلول وذلك بسبب كثافة الجو الشاردي وإعاقة حركة الشوارد لبعضها البعض ، لذلك فإن زيادة التركيز تؤدي إلى نقصان التشرد وتناقص الناقلية .

في محاليل الكهليليات الضعيفة (كحمض الخل) تكون كثافة الجو الشاردي صغيرة ولا تؤثر زيادة التركيز على حركية الشوارد ، عموماً زيادة التركيز تنقص التشرد وبالتالي تنقص الناقلية الكهربائية النوعية .

ويمكننا الحصول على الناقلية النوعية العظمى للمحاليل برسم خط بياني بين الناقلية النوعية والتركيز .

تزداد الناقلية الكهربائية النوعية بازدياد درجة الحرارة فعندما ترتفع حرارة المحلول درجة مئوية واحدة تزداد الناقلية بمعدل $(2-2.5) \%$. كما أن التجارب بينت أن الضغط يؤثر على الناقلية النوعية حيث تتناقص الناقلية النوعية بازدياد الضغط .

١٠- تطبيقات على قياس الناقلية النوعية :

بما أن الناقلية النوعية تتعلق بتركيز وحركة الشوارد في المحلول فبإمكاننا استخدام هذه الظاهرة في تحديد نقطة التكافؤ لبعض التفاعلات الكيميائية الشاردية .

١-١- المعايرة بواسطة قياس الناقلية النوعية χ :

تعتمد طريقة المعايرة هذه على تغير الناقلية النوعية χ تبعاً لتغير نوعية وتركيز الشوارد في المحلول خلال سير عملية المعايرة حيث χ تتناسب مع U حركية الشوارد في المحلول و C تركيز الشوارد في المحلول :

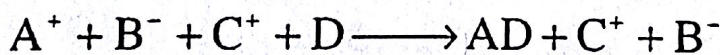
$$\chi \sim U.C$$

١-٢- الشكل العام لمنحنيات المعايرة بواسطة الناقلية النوعية :

بفرض أن المادة AB تتشرد $AB = A^+ + B^-$ ولنعايرها بواسطة المادة CD التي تتشرد حسب التفاعل $CD = C^+ + D^-$.

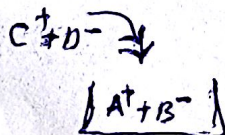
✗ إن إجراء المعايرة يتطلب أن يبقى حجم المحلول المدروس ثابتاً عملياً خلال مراحل المعايرة ، لأن الناقلية تتعلق بالتركيز الذي يتعلق بدوره بحجم المحلول ، لذلك يجب أن يكون تركيز المادة CD أو الكاشف أكبر بكثير من تركيز المادة المدروسة .

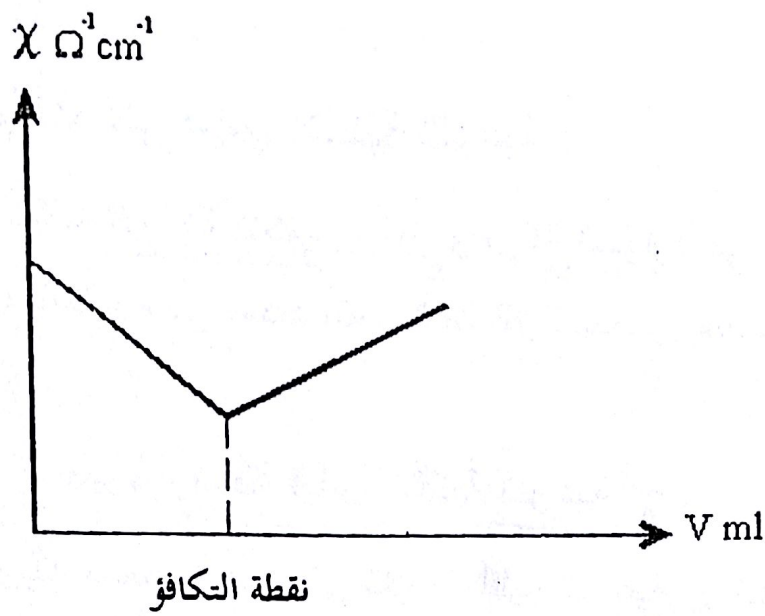
✗ من شروط نجاح المعايرة هذه يجب أن يتشكل نتيجة التفاعل إلكتروليت ضعيف التشرد أو راسب قليل الانحلال . نكتب معادلة التفاعل الحاصلة بالشكل :



ونميز هنا ثلاث حالات :

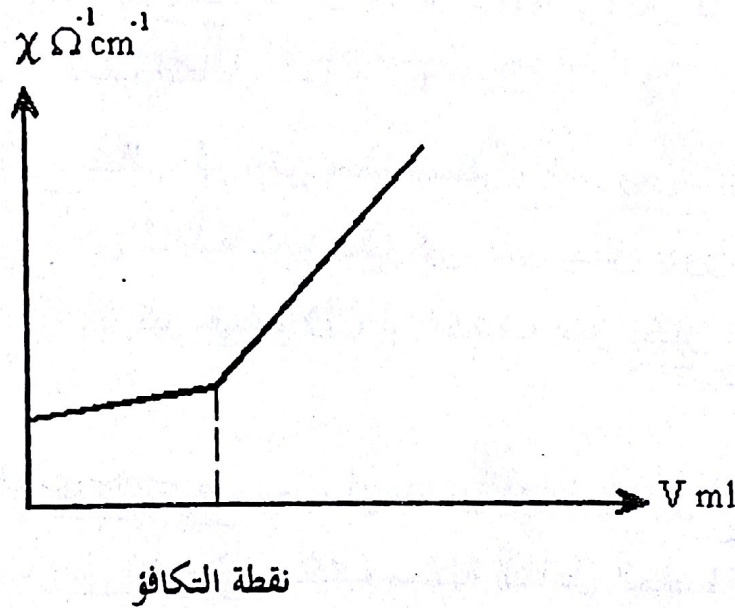
١- حركية الشوارد A^+ أكبر من حركية الشوارد C^+ أي $U_{A^+} > U_{C^+}$





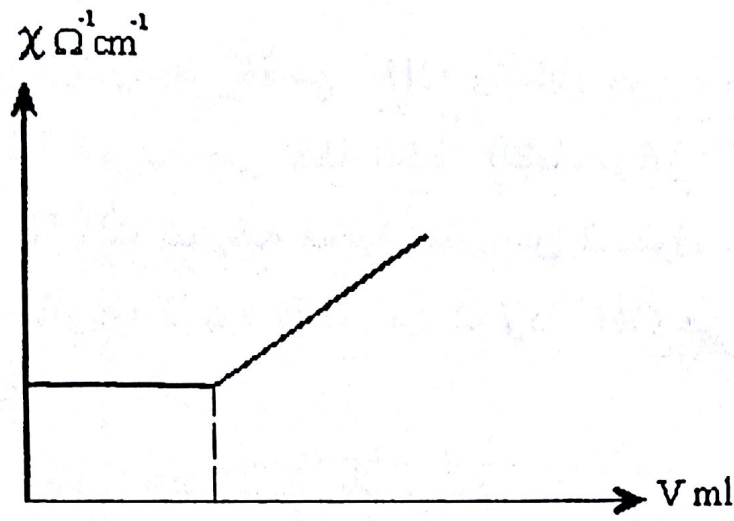
في هذه الحالة تتناقص الناقلية النوعية حتى نقطة التكافؤ بسبب استبدال شوارد A^+ بشوارد C^+ الأقل حركية . وبعد نقطة التكافؤ تزداد الناقلية النوعية بسبب زيادة تركيز شوارد C^+ الناتجة عن وجود فائض من الكاشف في المحلول .

٢- حركية الشوارد C^+ أكبر من حركية الشوارد A^+ أي $U_{C^+} > U_{A^+}$



تزداد الناقلية الكهربائية النوعية حتى الوصول إلى نقطة التكافؤ وذلك نتيجة استبدال شوارد A^+ بشوارد C^+ الأكثر حركية ، بعد نقطة التكافؤ تزداد الناقلية بسرعة أخرى بسبب وجود فائض من شوارد C^+ الناتجة عن فائض الكاشف .

٢- حركية A^+ مساوية تقريباً لحركية C^+ أي $U_{A^+} \approx U_{C^+}$

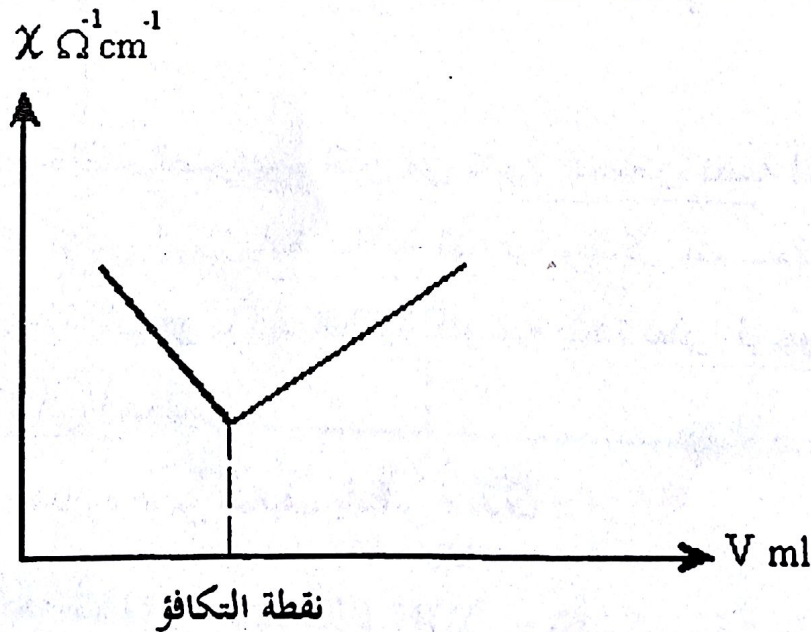
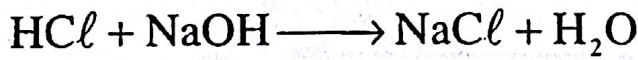


نقطة التكافؤ

لا تتغير الناقلية الكهربائية النوعية حتى نقطة التكافؤ لأنه يتم استبدال شوارد A^+ بشوارد C^+ التي لها نفس الحركة . بعد نقطة التكافؤ تزداد الناقلية الكهربائية النوعية وذلك بسبب وجود فائض من شوارد C^+ .
١٠-٣- أمثلة على المعايرة بواسطة الناقلية النوعية :

١٠-٣-١- معايرة حمض قوي بأساس قوي :

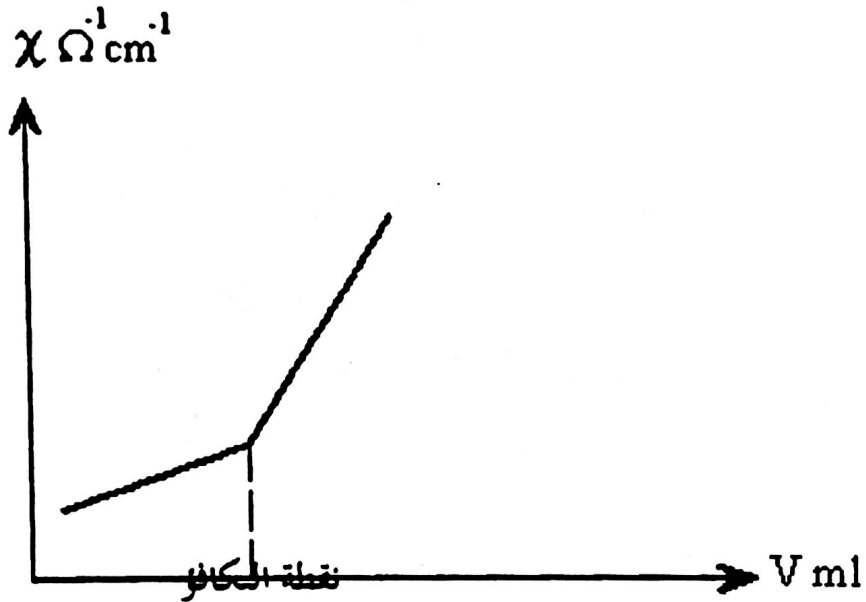
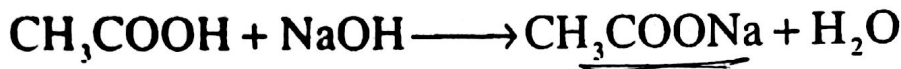
معايرة حمض كلور الماء HCl بواسطة الكاشف مائات الصوديوم $NaOH$ المعروف تركيزه :



خلال المعايرة يتم اتحاد H^+ مع OH^- وتشكيل جزيء ماء . في البداية تتناقص الناقلية النوعية حتى نقطة التكافؤ (انتهاء تركيز H^+ من المحلول) وذلك لأن شوارد H^+ ذات الحركية العالية تختفي من المحلول . بعد نقطة التكافؤ تزداد الناقلية النوعية لوجود فائض من شوارد OH^- في المحلول والتي تتمتع بحركية عالية .

١٠-٣-٢- معايرة حمض ضعيف بأساس قوي :

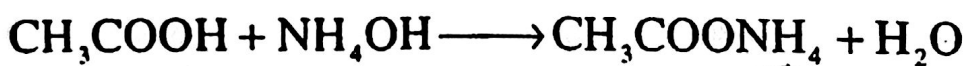
معايرة حمض الخل بماءات الصوديوم

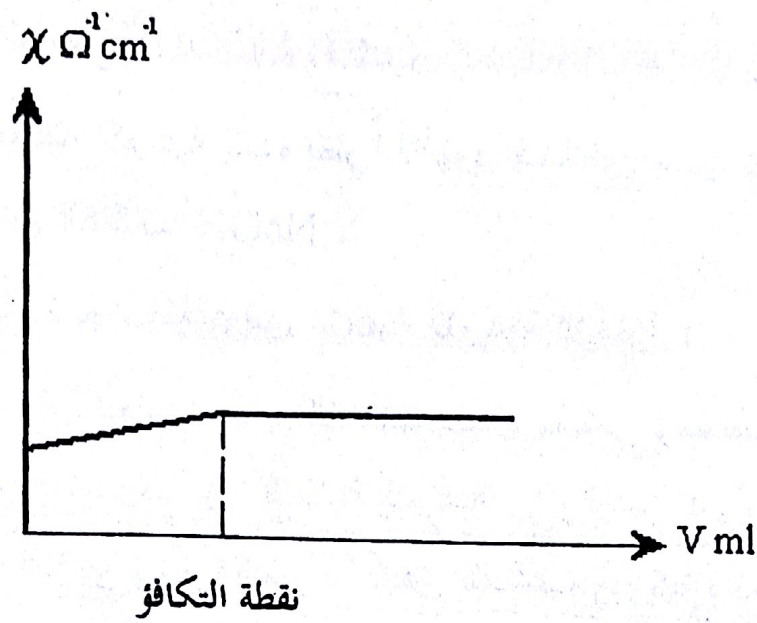


إن تشرّد ملح خلات الصوديوم أكبر من تشرّد الحمض نفسه لذلك فإن إضافة الكاشف سوف تؤدي إلى زيادة الناقلية النوعية وبشكل ضعيف حتى نقطة التكافؤ. بعد نقطة التكافؤ تزداد الناقلية النوعية بشدة نظراً لوجود فائض من شوارد OH^- في المحلول .

١٠-٣-٣- معايرة حمض ضعيف بأساس ضعيف :

التفاعل الحاصل :

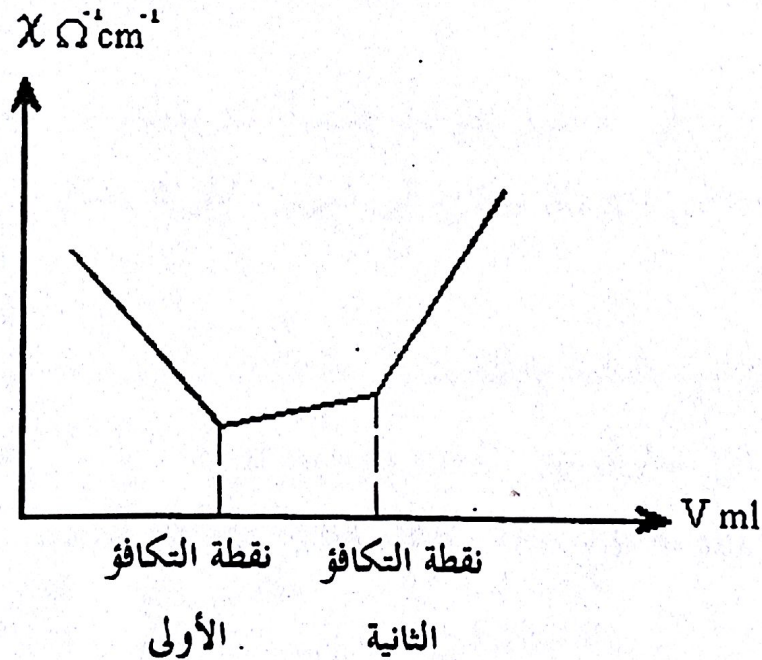




الملح المتشكل أكثر تشرداً من الحمض نفسه لذلك تزداد النقلية النوعية حتى نقطة التكافؤ . بعد نقطة التكافؤ تثبت النقلية النوعية لعدم تشرّد الفائض من الكاشف .

١٠-٣-٤ - معايرة مزيج من حمضين أحدهما قوي والآخر ضعيف بواسطة أساس قوي .

معايرة مزيج من حمض HCl القوي وحمض الخل الضعيف CH_3COOH بواسطة ماءات الصوديوم .



في البداية تتم معايرة الحمض القوي HCl لذلك تتناقص النقلية النوعية حتى نقطة التكافؤ ، وبعد نقطة التكافؤ تزداد النقلية النوعية بشكل ضعيف أثناء

معايرة الحمض الضعيف CH_3COOH وحتى نقطة التكافؤ الثانية .

بعد ذلك تزداد الناقلية النوعية بشدة نظراً لظهور فائض من شوارد OH^- والنااتجة عن فائض الكاشف NaOH .

١٠-٤- المعايرة بواسطة قياس الناقلية النوعية الزمنية :

تعتمد طريقة هذه المعايرة صب الكاشف بشكل مستمر ومنتظم فوق المحلول المدروس ثم رسم المنحنيات بين الناقلية النوعية χ والزمن t . ومن معرفة الزمن حتى نقطة التكافؤ ومعرفة سرعة تدفق الكاشف وتركيزه نحسب كمية المادة المجهولة . تستخدم هذه الطريقة على مجال واسع في الصناعة .

مسائل وتطبيقات غير محلولة

1- يمرر تيار كهربائي عبر أوعية تحليل كهربائية موصولة على التسلسل تحتوي على المحاليل التالية :

آ- كبريتات النحاس ، ب- كبريتات النيكل ، ج- كبريتات الحديد ، د- كلوريد الحديد .

احسب كمية المعدن المترسبة على مهبطات أوعية التحليل إذا علمت أن كمية الكلور المتشكلة عند المصعد تساوي 1.4 L في الشروط القياسية .

2- بامرار تيار شدته 5 A ولمدة 30 min يترسب على سطح مهبط وعاء التحليل 3.48 g من التوتياء . احسب الوزن المكافئ للتوتياء استناداً إلى تلك المعطيات .

3- احسب التركيز النظامي لمحلول نترات الفضة إذا علمت أن ترسيب كامل كمية الفضة الموجودة في 80 ml يحتاج إلى تمرير تيار شدته 0.3 A خلال زمن قدره 20 min .

4- يتحرر 2.153 g من الفضة نتيجة مرور كمية من الكهرباء ، وعند مرور نفس كمية الكهرباء في محلول ملح الذهب يترسب 1.314 g من الذهب ، فإذا كانت الكتلة المكافئة للفضة 107.9 g احسب الكتلة المكافئة للذهب ، ثم بين حالة الأكسدة في ملحه .

5- استخدم تيار شدته 10 A لطلاء النيكل في حوض يحتوي على كبريتات النيكل ، تكون خلالها النيكل والهيدروجين عند المهبط . فإذا علمت أن كفاءة التيار بالنسبة لتكون النيكل هي 60 % احسب ما يلي :

آ- كم غراماً من النيكل استعمل في طلاء المهبط في كل ساعة .

ب- ما هو سمك طبقة الطلاء إذا كان المهبط مربع الشكل وطول ضلعه 4 cm

وأن طلاؤه تمّ من الوجهين ، مع العلم أن كثافة النيكل 8.9 g/cm^3 .

ج- ما هو حجم الهيدروجين في الشروط النظامية والذي يتكون في كل ساعة.

6- ما هي كمية الكهرباء التي تلزم في خلية إلكتروليتيّة للحصول على 245 g من كلورات الصوديوم NaClO_4 نتيجة التحليل الكهربائي لكلوريت الصوديوم NaClO_3 مع العلم أن كفاءة المصعد هي 60% وذلك بسبب التفاعلات الجانبية.

7- كم ساعة تلزم لإنتاج 45.4 Kg من الكلور بواسطة التحليل الكهربائي لكلور الصوديوم في وعاء تحليل يمر فيه تيار شدته 1000 A ، علماً أن كفاءة المصعد بالنسبة للكلور تساوي 85% .

8- تمرر كمية معينة من الكهرباء خلال وعاءين منفصلين يحتوي أحدهما على محلول نترات الفضة AgNO_3 ويحتوي الآخر على SnCl_2 . فإذا ترسب 2 g من الفضة في خلية أحد الوعاءين احسب وزن القصدير المترسب في الوعاء الآخر .

9- تحتوي خلية تحليل كهربائي على محلول كبريتات النحاس CuSO_4 ومصعد مصنوع من النحاس النقي . كم كيلو غراماً من النحاس يمكن تنقيته (بترسيبه على المهبط) لدى مرور تيار كهربائي شدته 150 A لمدة 12 ساعة .

10- كم يلزم لتحليل 180 g من الماء في وعاء تحليل يمر فيه تيار شدته 3 A ؟

11- فسّر المنحني التالي واقترح المعايرة .

