

Study of the electrical and thermal conductivity of compounds and solid solutions resulting from the study of the triple system ($BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$)

Wajde Essa Saleh

Mohammed Deep

Faculty of Science || Tishreen University || Syria

Abstract: In this research, the electrical and thermal conductivity of the compounds $BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$ - $Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12}$ - $Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16}$ - $Cu_6Na_8S_6C_4O_{36}$ and the solid solutions resulting from the interaction of these compounds with each other, using the thermal conductivity measuring device (ITP-M64) and electrical conductivity measurement device (the four paths) were studied. The results are different between superconducting materials and medium conductive materials (semiconductors).

Keywords: Phase diagram, solid solution, Thermal conductivity, Electrical conductivity equilibrium phases, crystalline compounds

دراسة الناقلية الكهربائية والحرارية للمركبات والمحاليل الصلبة الناتجة عن دراسة الجملة الثلاثية ($BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$)

وجدى عيسى صالح

محمد ديب

كلية العلوم || جامعة تشرين || سوريا

المستخلص: في هذا البحث تم دراسة الناقلية الكهربائية والحرارية للمركبات $BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$ - $Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12}$ - $Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16}$ - $Cu_6Na_8S_6C_4O_{36}$ والمحاليل الصلبة الناتجة عن تفاعل هذه المركبات مع بعضها، باستخدام جهاز قياس الناقلية الحرارية (ITP-M64) وجهاز قياس الناقلية الكهربائية (المساري الأربعة)، والنتائج توضح وجود مواد فائقة الناقلية ومواد متوسطة الناقلية (أنصاف نواقل).

الكلمات المفتاحية: مخطط أطوار، محلول صلب، الناقلية الحرارية، مركبات بلورية، الناقلية الكهربائية، توازن أطوار.

المقدمة.

اهتمت الدراسات التقنية الحديثة منذ مطلع القرن العشرين بإنتاج مركبات صلبة بلورية لما لها من تطبيقات واسعة وأهمية كبيرة في المجالات التقنية المختلفة كتحضير الخزفيات والمواد المقاومة للانصهار وفي إنتاج مركبات بلورية تتمتع بصفات كهربائية نوعية كمكثفات كهربائية أو لها خواص كهربائية أخرى مثل بيزو الكترين وسكيتو إلكترين أو تحضير نواقل كهربائية أو إنتاج مركبات في مجالات التعدين المختلفة كتحضير الخلائط ذات مواصفات ميكانيكية وفيزيائية وكيميائية نوعية. (Jans et al, 1968) [1]

لهذا اتجهت الدراسات الحديثة لتحضير هذه المركبات سواء من تفاعلات العناصر البلورية الصلبة مع بعضها البعض (Zhang) (2006) [2] وتحضير منتجات من أكاسيدها (BENZEBEIRI) (2012) [3] أو من أملاحها (Bilousenko) وآخرون (2010) [4] يمكن أن نحصل على تراكيب بلورية جديدة عند نسب مولية مختلفة ودرجات حرارة متباينة لاسيما أن الأملاح المأخوذة لها خصائص نوعية ومتنوعة إذ يحضر منها مغناط دائمة أو تستخدم كمؤكسدات قوية أو كمدخرات كهربائية أو يمكن استخدامها في مجالات تكنولوجيا تقنية في مجالات الطب أو في مجالات أخرى في الصناعة (أصبغة، دهانات.....) (Wolfgang) وآخرون (2006) [5]. يعد مفهوم التحولات الطورية، الأساس للعديد من العلوم الطبيعية، كالكيمياء والفيزياء وعلم الأحياء، ومنها يعد المنطلق للعلوم الهندسية كالهندسة الميكانيكية والكهربائية وهندسة المواد. تعتبر التحولات الطورية شائعة في الطبيعة، فقد استفاد منها الإنسان في تطوير وتحسين مواد قديمة، ومنها استطاع التبحر في التحولات الطورية غير المألوفة (الموائع الفائقة، الناقلية الفائقة) والتي يمكن من خلالها إن يحل العديد من المشاكل التقنية التي كانت تواجه التكنولوجيا، ومازال هذا الباب مفتوحا مادامت إرادة تحسين الحياة على أساس التقدم العلمي موجودة.

أهمية البحث:

دراسة الناقلية الكهربائية والحرارية للمركبات $Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12}$ - $BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$ و $Cu_6Na_8S_6C_4O_{36}$ - $Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16}$ والمحالييل الصلبة الناتجة عن تفاعل هذه المركبات مع بعضها.

هيكلية الدراسة:

تم تقسيم هذه الدراسة إلى ثلاثة مباحث، يتناول المبحث الأول منها الإطار النظري للدراسة والدراسات السابقة، بينما يتطرق المبحث الثاني إلى الجزء العملي والمبحث الثالث إلى النتائج والمناقشة.

المبحث الأول - الإطار النظري والدراسات السابقة.

أولا - الإطار النظري:

تعرف الناقلية الكهربائية في المواد بأنها قابلية انتقال الشحنة الكهربائية من موقع إلى موقع آخر وتعتمد هذه على الأيونات والتي تتوقف قابلية حركتها على نوع المادة والإلكترونات وكذلك الفراغات الإلكترونية (vacancy electronic) تتكون الفراغات الإلكترونية في البنية البلورية ذات الروابط التساهمية في حالة فقدان أحد الإلكترونات من المزدوج الإلكتروني للرابطة. كما يتكون الفراغ الإلكتروني في المواد ذات الروابط الأيونية عند كسر الرابطة الأيونية فيتكون في هذه الحالة إلكترون حر (electron Free) وفجوة (Hole) وتعتبر الفجوات شحنة موجبة على الرغم من أنها في الحقيقة نقص في الشحنة السالبة ضمن البنية البلورية لقد اعتمد تصنيف المواد الصلبة على معاملات توصيلها الكهربائي، فأنا نجد أنواع ثلاثة منها

- 1- مواد جيدة التوصيل الكهربائي (الموصلات) وهي المواد الفلزية مثل النحاس الذي يكون معامل توصيله الكهربائي بحدود (10^7) .
- 2- أشباه الموصلات مثل السيليكون والجرمانيوم وكبريتيد الرصاص الذي معامل توصيله بحدود (10^2) .
- 3- مواد رديئة التوصيل الكهربائي (العوازل) مثل الأبونيت ومعامل توصيله (10^{-8}) ، ثم اكتشف فيما بعد مواد ذات موصلية فائقة (superconductor) أي أن مقاومتها للتيار الكهربائي تصبح صفرا عند التبريد لدرجه معينة من درجات الحرارة.

الناقلية الحرارية أو انتقال الحرارة بالتوصيل يعرف على أنه الانتقال التلقائي للطاقة الحرارية عبر المادة من منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة إلى منطقة أخرى ذات درجة حرارة أقل من سابقتها سعياً وراء الوصول إلى تجانس حراري.

غالباً ما نصادف في جملة ما أكثر من نوع لانتقال الحرارة.

هناك ثلاث طرائق لانتقال الحرارة من جسم إلى آخر أو في الجسم نفسه، هي التوصيل (conduction) والحمل (convection) والإشعاع (radiation).

التوصيل:

يتم انتقال الحرارة في طريقة التوصيل من أكثر الجزيئات طاقة إلى أقلها طاقة؛ ففي الأجسام الصلبة الرديئة التوصيل الكهربائي (العوازل) يتم انتقال الحرارة بفضل قوى المرونة التي تربط بين الذرات التي تهتز حول أوضاع توازنها، فالأمر هنا يقتصر على انتقال الطاقة الاهتزازية عبر الشبكة البلورية للجسم الصلب بشكل كمات (quanta) تسمى فونونات (phonons) أما في الموائع (السوائل والغازات) فيتم انتقال الحرارة بفضل اصطدام أكثر الجزيئات طاقة حركية بأقلها طاقة. وفي الأجسام الصلبة الجيدة التوصيل الكهربائي (المعادن) يتم انتقال الحرارة بفضل عاملين هما: قوى المرونة التي أشير إليها في حالة الأجسام الرديئة التوصيل الكهربائي. والإلكترونات الحرة، وهي إلكترونات حرة الحركة في المعادن وتسلك سلوك الجزيئات في الغازات وتنتشر خلال المعدن من المنطقة الأكثر حرارة إلى أقلها حرارة ناقلة الطاقة باصطدامها في المنطقة الباردة بعضها ببعض وبأيونات شوارد الشبكة البلورية.

الحمل:

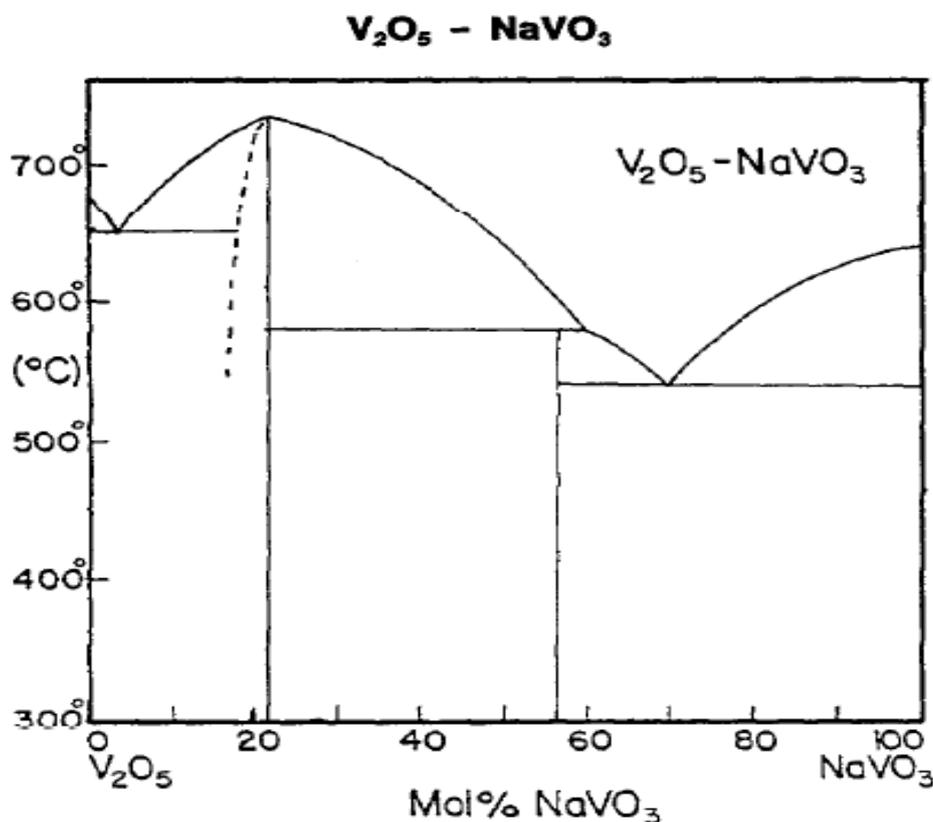
يتم انتقال الحرارة في طريقة الحمل نتيجة اختلاف الكتلة الحجمية للمائع من منطقة إلى أخرى بسبب اختلاف درجة الحرارة، إذ إن ازدياد درجة الحرارة يرافقه نقصان في الكتلة الحجمية لمعظم الموائع (السوائل والغازات)؛ فإذا زُود المائع بالحرارة من الأسفل ارتفع المائع الأقل كثافة وحل محله الأكبر كثافة وحدثت تيارات الحمل ناقلة الطاقة الحرارية. ويوصف الحمل حينئذ بأنه طبيعي، ومثال ذلك جريان الرياح في جو الأرض وجريان الماء في جهاز تدفئة مائية في المباني، وتيارات المحيطات التي يتعدل مجراها بحركة الأرض وبتضاريسها. وإذا استعملت مروحة أو مضخة لتوليد تيارات الحمل والمحافظة عليها كما هي الحال في التدفئة المركزية عادة قيل حينئذ إن انتقال الحرارة يتم بالحمل القسري.

الإشعاع:

يختلف انتقال الحرارة بالإشعاع عن الطريقتين السابقتين بأنه يتم في الخلاء بين أجسام بعيد جداً بعضها عن بعض من دون حاجة إلى وسط ناقل وبسرعة هي سرعة الضوء (إشعاع الشمس مثلاً)، كما يختلف عنهما في أن الإشعاع يخترق بعض الأجسام المادية من دون أن تمتصه كلاً (اختراق الإشعاع الشمسي للجو الأرضي مثلاً). كذلك فإن انتقال الحرارة بالإشعاع يختلف عن طريقتي التوصيل والحمل السابقتين من حيث آليته mechanism، فكل جسم، مهما تكن درجة حرارته، يصدر إشعاعاً كهرومغناطيسياً معقداً بفضل الطاقة الحرارية لجزيئاته، ويمكنه، في الوقت نفسه، إذا سقط عليه إشعاع حراري من أجسام أخرى، أن يمتص قسماً من طاقة هذا الإشعاع فتزداد طاقته الحرارية، أما ما لم يمتصه الجسم فينعكس عنه إذا كان غير شفاف أو ينفذ منه إذا كان شفافاً.

ثانيا - الدراسات السابقة.

- دراسة جملة مؤلفة من أكسيد الفاناديوم الخماسي V_2O_5 مع ميتافانادات الصوديوم $NaVO_3$ والشكل (1) يوضح مخطط التوازن الطوري، التي اجريت من قبل الباحثين (V.Danek) (J.Balajka) (K.Matiasovsky) (1974)] [6



الشكل (1) مخطط التوازن الطوري لجملة مؤلفة من خماسي أكسيد الفاناديوم مع ميتافانادات الصوديوم. وتم دراسة الخواص الكهربائية والتوتر السطحي والكثافة لهذه الجملة كما تبين الجداول (1-2-3).

الجدول (1) الناقلية الكهربائية للجملة المدروسة وتغيراتها مع تغير درجة الحرارة.

Ref.	Mol % NaVO ₃	Temp. range (K)	Comments
179	0-100	923-1173	Pt crucible and Pt disk electrodes
175	0	950-1200	Pt crucible; Pt electrodes (calib. 0.01 and 0.1 N KCl)
176	0-26.3	998-1098	Pt crucible; Pt electrodes; oxygen atmosphere (calib. 0.01 M KCl; molten KCl)

Deviations from previous NSRDS recommendations [1]			
Ref.	V ₂ O ₅ Mol %	Min. departure	Max. departure
179	100	85% (1200 K)	300% (1140 K)
175	100	results do not overlap in T range	
176	100	~180% (1215 K)	~200% (1128 K)

الجدول (2) دراسة الكثافة لهذه الجملة وتغيراتها بحسب درجة الحرارة والنسب المئوية.

V₂O₅ - NaVO₃; Density (g cm⁻³)

T(K)	Mol percent NaVO ₃			
	80	60	40	20
920	2.43	2.45		
980	2.40	2.42	2.46	
1040	2.38	2.40	2.43	2.40
1100	2.35	2.38	2.40	2.39
1160	2.33	2.35	2.38	2.37

Temperature-dependent equations

$$\rho = a + bT$$

Mol percent NaVO ₃	a	-b x 10 ³
100	2.766	0.532
80	2.810	0.414
60	2.822	0.406
40	2.896	0.448
20	2.650	0.240
0	2.856	0.450

الجدول (3) قيم اللزوجة للجملة المدروسة وتغيراتها بحسب درجة الحرارة والنسبة المئوية للأملاح الداخلة تركيبها.

$V_2O_5 - NaVO_3$: Viscosity (cp)

T(K)	Mol percent Na_2VO_3				
	80	57	32	20	10
920	85	26			
980	62	19	34		58
1040	43	15	23	51	45
1100	29	12	17	38	35
1160	19	10	14	31	29

- دراسة جملة مؤلفة من $(BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3)$ التي أجريت من قبل الباحثين:

[7] (2020) (Saleh) (Deep)

في هذه الدراسة تم دراسة الجمل الثنائية الآتية على التوالي $(BaCl_2-Na_2CO_3)$ - $(BaCl_2-CuSO_4)$ $(CuSO_4-Na_2CO_3)$ من خلال تحضير عينات في كل جملة وفق الطريقة السيراميكية ودراسة هذه العينات المحضرة باستخدام (XRD, DTA, MP, EDX, SEM) ورسم مخططات الجمل الثنائية بالاعتماد على هذه نتائج تحليل العينات المحضرة ثم رسم مخطط الجملة الثلاثية $(BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3)$ وتم الحصول على مركبات بلورية جديدة $(Cu_6Na_8S_6C_4O_{36} - Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16} - Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12})$ ومحاليل صلبة جزئية ومستمرة. وتم رسم مخطط التوازن الطوري للجملة المدروسة كما هو موضح بالشكل (2):

المبحث الثاني: الجزء العملي.

الأجهزة والأدوات

- مكبس يدوي لضغط العينات.
- جهاز قياس الموصلية الحرارية (ITP-M64).
- جهاز قياس الموصلية الكهربائية (جهاز المساري الأربعة شركة SIGNATONE).

المواد المستخدمة

- كلوريد الباريوم (MERCK 99.9% $BaCl_2$)
- كبريتات النحاس الثنائية (MERCK 99.9% $CuSO_4$)
- كربونات الصوديوم (MERCK 99.9% Na_2CO_3)

جهاز قياس الناقلية الحرارية (ITP-M64):

تم تحضير تسع عينات من أجل دراسة الناقلية الحرارية لهذه العينات المحضرة باستخدام جهاز الناقلية الحرارية نوع ITP-M64 والعينات المحضرة هي المركبات $Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12}$ - $BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$ - $Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16}$ - $Cu_6Na_8S_6C_4O_{36}$ والمحاليل الصلبة الناتجة عن تفاعل هذه المركبات مع بعضها، تم تجهيز هذه العينات على شكل أقراص باستخدام مكبس يدوي والنتائج موضحة بالشكل (5)

الجدول (5) يبين الناقلية الحرارية للعينات المحضرة:

الناقلية الحرارية (واط.م ⁻¹ .كلفن)	العينة
18.4	$BaCl_2$
302	$CuSO_4$
152	Na_2CO_3
95	$X = Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12}$
184	$Y = Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16}$
326	$Z = Cu_6Na_8S_6C_4O_{36}$
120	محلول صلب X
198	محلول صلب Y
315	محلول صلب Z

قياس الناقلية الكهربائية (جهاز المساري الأربعة شركة SIGNATONE):

حضرت تسع عينات من أجل دراسة الناقلية الكهربائية لهذه العينات باستخدام جهاز الناقلية الكهربائية (المساري الأربعة) والعينات المحضرة هي المركبات $Ba_6Na_8C_4Cl_{12}O_{12}$ - $BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3$ - $Ba_6Cu_4S_4Cl_{12}O_{16}$ - $Cu_6Na_8S_6C_4O_{36}$ والمحاليل الصلبة الناتجة عن تفاعل هذه المركبات مع بعضها، تم تجهيز هذه العينات على شكل رقائق باستخدام ضاغط هيدروليكي ثم تم طلي الرقائق بالفضة في درجة حرارة (25) درجة مئوية وكانت النتائج موضحة في الجدول (6)

الجدول (6) يبين الناقلية الكهربائية للعينات المحضرة:

الناقلية الكهربائية ($\mu\text{S}/\text{CM}$)		العينة
Out	In	
38900	98800	BaCl_2
68210	97700	CuSO_4
45100	114600	Na_2CO_3
47700	105600	$X = \text{Ba}_6\text{Na}_8\text{C}_4\text{Cl}_{12}\text{O}_{12}$
20350	48700	$Y = \text{Ba}_6\text{Cu}_4\text{S}_4\text{Cl}_{12}\text{O}_{16}$
72246	85645	$Z = \text{Cu}_6\text{Na}_8\text{S}_6\text{C}_4\text{O}_{36}$
27210	64340	محلل صلب X
36480	75870	محلل صلب Y
71360	101000	محلل صلب Z

المبحث الثالث: النتائج والمناقشة.

بالمقارنة مع الناقلية الحرارية والكهربائية للمواد بالاعتماد على المراجع الآتية:

- (Bird) (Stewart) (Lightfoot) (1960) [8]
- (Gray) (2004) [9]

نلاحظ من النتائج المبينة في الجدولين (5-6) أن الناقلية الكهربائية والحرارية لكبريتات النحاس والمركب $Z = \text{Cu}_6\text{Na}_8\text{S}_6\text{C}_4\text{O}_{36}$ والمحلل الصلب Z لهم خواص كهربائية وحرارية عالية (الناقلية الفائقة)، أما بقية المواد فتتمتع بناقليه حرارية وكهربائية وسطية (أشبه ناقل).

لكبريتات النحاس نظام بلوري معيني بحيث تكون النظام البلوري مؤلف من طبقات فوق بعضها البعض وبين هذه الطبقات يوجد فراغات أو فجوات تساعد في حركة وانتقال الإلكترونات بسرعة أكبر وبالتالي ينتج عنها ناقلية كهربائية عالية وبنفس الوقت هذه الطبقات والفجوات تساعد في انتقال الفونونات والتي تساهم في انتقال الحرارة وهذا يؤكد أن الناقلية الحرارية والكهربائية مرتبطان مع بعضهما بعلاقة طردية.

أما المحلول الصلب z والمركب z أيضا يتمتعان بناقلية حرارية وكهربائية عالية بسبب وجود عدد إلكترونات كبير، وهذه الإلكترونات ناتجة عن تفكك الروابط في الشبكات البلورية أثناء اندماج كربونات الصوديوم وكبريتات النحاس عند نسب مولية محددة.

التوصيات والمقترحات.

1. تعميم هذه التجربة على بعض المنشآت لما قد تحققه من تطور في الصناعات التكنولوجية.
2. تطبيق هذه الدراسة على أنواع أخرى من المركبات.
3. قد يكون من المفيد الربط بين الأبحاث التي تتناول نفس المواضيع

قائمة المراجع.

أولاً- المراجع بالعربية:

- ديب، محمد (2006). علم التعدين، كلية العلوم - جامعة تشرين
- ديب، محمد (2006). كيمياء البلورات، كلية العلوم - جامعة تشرين
- فرمان، محمد؛ والمظفر نعمة (2001). فيزياء الالكترونيات، كلية العلوم - جامعة الموصل.

ثانياً- المراجع بالفرنسية والإنجليزية:

- Benzebeiri, D. (2012). Synthèse, étude structural et caractérisations des céramiques PZT de type pérovskite $Pb_{1-x}Ca_x [(Zr_{0.53}, Ti_{0.47})_{0.75} Sb_{0.25}] O_3$.
- Benzebeiri, D. (2012). Synthèse, étude structural et caractérisations des céramiques PZT de type pérovskite $Pb_{1-x}Ca_x [(Zr_{0.53}, Ti_{0.47})_{0.75} Sb_{0.25}] O_3$.
- Bilousenko, P. I., Inshakova, I. O., Kachailo, K. A., Merkulova, O. V., & Stovbur, L. M. (2010). Narysy z istoriiukraïinskohoslovotvorenna (imennykovikonfiksy)[Essays on the history of Ukrainian word formation (noun affixes)].
- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (1960). Transport Phenomena John Wiley & Sons. New York, 413.
- Bortolotti, M., Lutterotti, L., & Lonardelli, I. (2009). ReX: a computer program for structural analysis using powder diffraction data. Journal of applied crystallography, 42 (3), 538-539.
- Boudraa, I. (2010). Synthèse et étude structurale par diffraction des rayons X des phosphates mixtes des métaux à valences II, III et V.
- Danek, V., Votava, I., Matiasovsky, K., & Balajka, J. (1974). Study of the system V_2O_5 - Na_2O . II. Physicochemical properties of the molten V_2O_5 - $NaVO_3$ mixtures. Inst. Of Inorganic Chemistry, Bratislava.
- Deep, M., & Saleh, W. E. (2020) Study of Phase Equilibrium in the the three system. $(BaCl_2-CuSO_4-Na_2CO_3)$
- Gray, J. R. (2004). Conductivity analyzers and their application. Environmental instrumentation and analysis handbook, 491-510.
- Heyes, A., Crout, P., & Ryle, W. (2002). HIGHLIGHTS OF THE.
- Janz, G. J., Janz, G. J., Dampier, F. W., Lakshminarayanan, G. R., Lorenz, P. K., & Tomkins, R. P. T. (1968). Molten salts: Volume 1. Electrical conductance, density, and viscosity data.
- Le Dréau, L. (2011). Phase transitions and oxygen ordering in $La_2CoO_{4+\delta}$ and (T, T') - La_2CuO_4 : single crystal growth and structural studies using synchrotron and neutron diffraction methods (Doctoral dissertation, Université Rennes 1, France, 2011).

- Lemmens, P., & Millet, P. (2004). Spin—Orbit—Topology, a triptych. In Quantum Magnetism (pp. 433-477). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Levey, A. S., Coresh, J., Greene, T., Stevens, L. A., Zhang, Y., Hendriksen, S., ...& Van Lente, F. (2006). Using standardized serum creatinine values in the modification of diet in renal disease study equation for estimating glomerular filtration rate. *Annals of internal medicine*, 145 (4), 247- 254.
- Lutterotti, L., Matthies, S., & Wenk, H. R. (1999). MAUD: a friendly Java program for material analysis using diffraction. *IUCr: Newsletter of the CPD*, 21 (14-15).
- Rodríguez-Carvajal, J. (1993). Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, 192 (1-2), 55- 69.
- Rueping, M., Antonchick, A. P., & Theissmann, T. (2006). Remarkably low catalyst loading in Brønsted acid catalyzed transfer hydrogenations: enantioselective reduction of benzoxazines, benzothiazines, and benzoxazinones. *Angewandte Chemie International Edition*, 45 (40), 6751-6755.
- Sahraoui, K. (2008). Etude des propriétés diélectriques et structurales des céramiques du type BaTiO₃-CaTiO₃.
- Souza, E. C. C. D., & Muccillo, R. (2010). Properties and applications of perovskite proton conductors. *Materials Research*, 13, 385-394.
- Wolfgang Laue, Michael Thiemann, Erich Scheibler, Karl Wilhelm Wiegand (2006) "Nitrates and Nitrites" in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, Weinheim
- Zhang, Y. (2006). Ca-Sr, systems *Journal of alloys and compounds*.