

## حساب السعة الحرارية $C_p$ لمادة سيليسيد القصدير (SnSe) باستخدام قانون دي لوني

عمر أحمد القايدی<sup>1</sup> و بسمة الهاדי الذيب<sup>2</sup>

<sup>1</sup> كلية الهندسة صبراتة- جامعة صبراتة.

<sup>2</sup> كلية التربية أبو عيسى- جامعة الزاوية.

\* [b.aldeeb@zu.edu.ly](mailto:b.aldeeb@zu.edu.ly)

### الملخص

باستخدام قانون دي لوني الذي يعَد الحل العددي لدباي، تم حساب قيم نظرية للسعة الحرارية  $C_p$  كدالة في درجة الحرارة المطلقة لمادة سيليسيد القصدير (SnSe) لمجال درجة حرارة من 20K إلى K 500، حيث كانت درجة حرارة دباي المستخدمة هي  $K = \theta D = 220$ . أوضحت النتائج أن القيم النظرية للسعة الحرارية  $C_p$  التي تم التوصل إليها بواسطة قانون دي لوني متطابقة بشكل ممتاز جداً مع البيانات التجريبية ومع توزيع لامبرت بولتزمان ودول دباي ذات البعد n. وهذا يؤكّد أن قانون دي لوني المستنبط من قانون دباي التكاملي قادر أيضاً على تمثيل السعة الحرارية  $C_p$  بدقة عالية.

**الكلمات الرئيسية:** سيليسيد القصدير؛ درجة حرارة دباي؛ السعة الحرارية  $C_p$ ؛ قانون دي لوني.

### Abstract

Delaunay's law, which is the numerical solution for Debye, was used to determine the theoretical values of heat capacity  $C_p$  of tin selenide (SnSe). Temperature range was between 20 K and 500 K, and the Debye temperature used was  $\theta D = 220$  K.

The results showed that the theoretical values of heat capacity  $C_p$  obtained by Delaunay's law were to a large extent compatible with the experimental data, with Lambert Boltzmann distribution, and with n-dimensional Debye functions. This confirms that Delaunay's law derived from Debye's integral law can represent heat capacity  $C_p$  with high accuracy.

### المقدمة

يعَد مركب سيليسيد القصدير (SnSeTin selenide) من المركبات غير العضوية، ونوع من الكالكوجينيدات المعدنية (Chalcogenides metal) ذات الطبقات (Layered – Metal).

–)، والتي تتنتمي إلى عائلة الملح الصخري (rock salt) وتكون مشابهة لكلوريد الصوديوم (NaCl)، ويصنف (Tin selenide) ضمن أشباه الموصلات الثانية حيث ينتمي للمجموعة (IV & VI) من الجدول الدوري، ويكون من عنصرين: الأول من العمود الرابع (IV) وهو Sn والثاني من العمود السادس (VI) وهو Se، وهو أحد المركبات السيليسيوية (selenides) التي لقيت في الآونة الأخيرة اهتماماً متزايداً، وذلك لامتلاكها العديد من الخصائص الفيزيائية المثيرة للاهتمام بالإضافة إلى تطبيقاتها التكنولوجية الفريدة، حيث تستخدم في نطاق واسع كنظم تسجيل مجسم (holographic recording systems)، وفي الخلايا الشمسية (Solar cells)، وأجهزة تحويل الذاكرة الإلكترونية (memory switching devices) وكذلك في تخزين الطاقة (energy storage) والأجهزة الكهروضوئية (photovoltaic devices) (Elkorashy, 1991; Xie et al., 2000; Bernardes-Silva et al., 2005; Zhang et al., 2014; Tannaranam et al., 2019).

يُعد نموذج ديباي النموذج الأول الذي يقترب بشكل كبير من القياسات التجريبية للسعة الحرارية للمواد الصلبة، حيث وصلت نتائجه إلى علاقة تكاملية، هذه العلاقة تعدّ من المعضلات التي أعادت الكثير من البحوث الخاصة بالمادة المكثفة؛ لأنّه من الصعب مكاملتها رياضياً وتحليلياً، كما أنها تعبر عن نوع المادة وخصائصها الفيزيائية، إلا أنّ هذه العلاقة حلت عددياً من العالم دي لوني (Delaunay) إذ جعل هذا التكامل حالياً من المعاملات الفيزيائية التي ترتبط بنوع واحد من الذرات من خلال إجراء بعض الافتراضات والتعويضات الرياضية، بهذه الطريقة العددية استطاع إيجاد أربعين نقطة النظرية لمادة Cp. لمادة البحث.

لكون أن السعة الحرارية من أهم المواقع الخاصة بفيزياء المادة الصلبة، وأنّها تبين الشكل العام لما يحدث داخل المادة بتغيير درجة الحرارة، وتعدّ الشرط الأساسي للعديد من التطبيقات، ودراستها للمواد لها أهمية كبيرة؛ فمن قياسات السعة الحرارية الدقيقة يمكن إيجاد الإنترóبíي بشكل مباشر؛ لأن الإنترóبíي هو مقياس للاضطراب في المواد، كما أن دراسة السعة الحرارية لها ميزة العثور على ظواهر جديدة تحدث مع تغير درجة الحرارة (Kittel, 1996؛ يحيى الجمال، 2000؛ يسري مصطفى، 2007)، الأمر الذي دفع العديد من الباحثين لتطوير تقنيات تجريبية ونظيرية لتعيين السعة

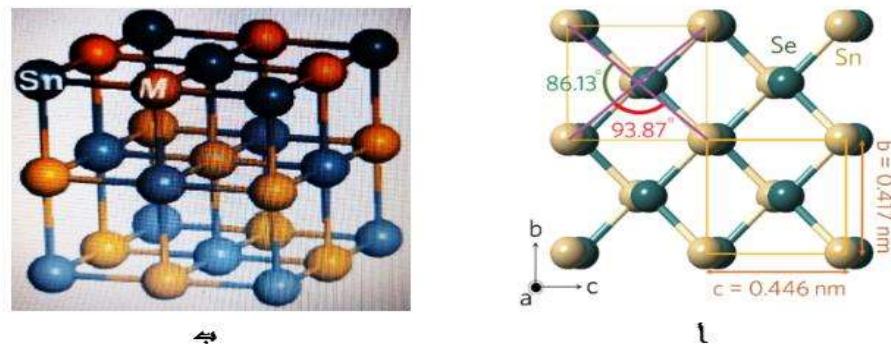
الحرارية للمادة الصلبة في مختلف درجات الحرارة، من بين الباحثين Wiedemeier وآخرون الذين قاموا في عام 1981 بتحديد القيم التجريبية المعملية لمادة SnSe لمدى درجة الحرارة من K 20 إلى 500 K باستخدام Aliev, a computer interfaced differential scanning calorimeter K 500 وأخرون الذين قاموا سنة 1987 بإيجاد قيم معملية لسعة الحرارية لمادة البحث في مدى درجة الحرارة من K 55 إلى K 350 بواسطة adiabatic calorimetry، وكذلك الحسابات النظرية التي قام بها Eser وأخرون في عام 2011 لغرض تحديد قيم لسعة الحرارية  $C_p$  من درجة K 20 إلى K 500 باستخدام دوال ديبي ذات البعد  $n$  (n-dimensional Debye functions) لبعض المركبات شبه الموصلة، والدراسة التي قامت بها Boussaid وأخرون سنة 2019 لأجل تعين بعض القيم النظرية  $C_p$  لبعض مركبات أشباه الموصلات بالاعتماد على دالة Lambert W لامبرت (Function).

لذلك سيتم في هذا البحث تقديم تعبيرًا تحليليًّا لحساب السعة الحرارية  $C_p$  لمادة البحث باستخدام الاستكمال العددي الحاسوبي لقانون دي لوني المستخلص من قانون ديبي لمدى يمتد من K 20 إلى K 500، للتحقق من صحة ذلك التعبير التحليلي سيتم مقارنة نتائجه مع القياسات التجريبية المعملية لمادة SnSe (Wiedemeier et al., 1981)، بالإضافة إلى مقارنتها مع القيم النظرية لسعة الحرارية  $C_p$  المحسوبة بطريقتين مختلفتين (Eser et al., 2011; Boussaid et al., 2019).

### التركيب البلوري والخصائص الفيزيائية لمادة سيليسيون القصدير

سيليسيون القصدير هو مسحوق صلب رمادي اللون عديم الرائحة، يتبلور بهيكيل معيني (orthorhombic) مع أطوال خلية الوحدة (unit cell lengths)  $a = 11.57\text{\AA}$ ,  $b = 4.17\text{\AA}$ ,  $c = 4.46\text{\AA}$ ، كما يوضحها الشكل (1أ)، وذلك عند درجة حرارة أقل من K 750، أما عندما ترتفع درجة الحرارة إلى حوالي K 813، فإن بلورة SnSe تظهر انتقال طوري من المعيني (orthorhombic) إلى الطور المكعب (cubic phase)، والشكل (1ب) يوضح التركيب البلوري لسيليسيون القصدير (SnSe) كالتراكيب البلوري لكلوريد الصوديوم (الملح الصخري (rock salt)، (V. V. Zhdanova, 1961; A. Shafique & Y. H. Shin, 2017) وله فجوة طاقة مباشرة (Direct Band Gap) وغير مباشرة (Indirect Band Gap) بين نطاق

التوصيل والتكافؤ وذلك عند درجة حرارة الغرفة، (Zhao et al., 2015; Carter et al., 2014) والجدول (1) يبين أهم الخصائص الفيزيائية لهذا المركب.



الشكل (1): يبين

- أ. أطوال وحدة الخلية لمركب سيلينيد  
القصدير (SnSe).
- ب. التركيب البلوري لـ  $\text{SnSe}$  حيث  $\text{M:Se}$  حيث  
كالتركيب البلوري لكلوريد الصوديوم  
. (الملح الصخري (rock salt))

الجدول (1): يبين أهم الخصائص الفيزيائية الحرارية لمادة  $\text{SnSe}$  عند درجة الحرارة الغرفة (300K)

(L. D. Zhao, 2014)

Properties	Tin selenide
Molecular formula	$\text{SnSe}$
Molar mass	197.67 g/mol
Crystal structure	Orthorhombic
Appearance	Steel gray odorless powder
density	6.18 g/cm <sup>3</sup>
Space group	$Pnma$ , No. 62
Melting temperature (H. Wiedemeier et al., 1981; O. Boussaid et al., 2019)	$T_m = 1134$ K
Debye temperature (H. Wiedemeier et al., 1981)	$\theta_D = 220$ K
Einstein temperature (O. Boussaid et al., 2019)	$\theta_E = 177.31$ K
Thermal conductivity	$0.46 - 0.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Direct Band Gap (R. Carter et al., 2014; S. Zhao et al., 2015)	1.3 eV
In Direct Band Gap (R. Carter et al., 2014; S. Zhao et al., 2015)	0.9 eV
Lattice constants (A. Okazaki, 1956; R. W. G. Wyckoff, 1963)	$a = 11.57 \text{ \AA}^\circ$ ; $b = 4.17 \text{ \AA}^\circ$ ; $c = 4.46 \text{ \AA}^\circ$
Solubility in water	Negligible

## النظيرية (معادلة السعة الحرارية $C_p$ وتطبيقاتها على مركب أشباه الموصلات SnSe)

السعه الحراريه CV حسب نموذج ديباي تعطي بالعلاقة (Ashcroft & Mermin, 1976؛ يسري مصطفى، 2007):

$$(1) \quad C_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_V = \frac{9ZN_A\hbar^2}{\omega_D^3 k_B T^2} \int_0^{\omega_D} \frac{\omega^4 e^{\hbar\omega/k_B T} d\omega}{(e^{\hbar\omega/k_B T} - 1)^2},$$

حيث  $Z$  عدد ذرات الجزيء الواحد،  $N_A$  عدد أفوجادرو،  $\hbar$  ثابت بلانك مقسوماً على  $2\pi$ ،  $\omega$  التردد الزاوي،  $\omega_D$  التردد الزاوي الأكبر لدباي و  $k_B$  ثابت بولتزمان،  $T$  درجة الحرارة المطلقة (Ashcroft & Mermin, 1976؛ يسري مصطفى، 2007)، من خلال هذه العلاقة التكاملية استخلاص دي لوني (Delaunay, 1956) حلّ عددياً يعطي بالعلاقة التالية:

$$(2) \quad C_v = \frac{9ZN_A\hbar^2\omega_D^2}{k_B T^2} \int_0^1 \frac{P^4 e^{(\hbar\omega_D/k_B T)P} dP}{(e^{(\hbar\omega_D/k_B T)P} - 1)^2},$$

حيث  $x = \frac{T}{\theta_D}$  وبما أن  $\theta_D = k_B \theta_D = \hbar\omega_D$  درجة حرارة ديباي، وبوضع  $y = \frac{C_v}{3ZR}$ ، نحصل على العلاقة (Delaunay, 1956):

$$(3) \quad y = \frac{3}{x^2} \int_0^1 \frac{P^4 e^{P/x} dP}{(e^{P/x} - 1)^2},$$

وهذه العلاقة توضح كيف اختزل دي لوني تكامل ديباي إلى شكل رياضي خالٍ من أي شيء يخص مادة بعينها، ومن خلالها نحصل على السعة الحراري CV، وللحصول على معادلة السعة الحراري (Nernst, 1911; Rabe Nernst–Lindemann، التي تعطي بالعلاقة  $C_p$ ، تم استخدام معادلة Cp & Joannopoulos, 1985)

$$(4) \quad C_p(T) - C_v(T) = A_0 [C_p(T)]^2 \frac{T}{T_m},$$

كما يمكن كتابة المعادلة أعلاه بالشكل التالي:

$$(5) \quad C_p(T) = \frac{T_m}{2A_0 T} \left[ 1 - \left[ 1 - 4A_0 \frac{T}{T_m} C_v(T) \right]^{\frac{1}{2}} \right],$$

حيث إن  $T_m$  درجة حرارة الانصهار (melting temperature)،  $A_0 = 5.1 * 10^{-3} \frac{J}{mol \cdot K}$ ، درجة الحرارة المطلقة. بسبب الحجم الصغير نسبياً لـ  $A_0$ ، يمكن استخدام متسلسلة تايلور (Taylor series) لتصبح المعادلة السابقة بالصيغة التالية (Passler, 2007; Schick, 2013) :

$$(6) \quad C_p(T) = C_v(T) + A_0[C_v(T)]^2 \frac{T}{T_m},$$

من خلال المعادلة (3) يمكن كتابة المعادلة (6) بالشكل التالي:

$$(7) \quad C_p(T) = 3ZRY + A_0[3ZRY]^2 \frac{T}{T_m},$$

### النتائج والمناقشة

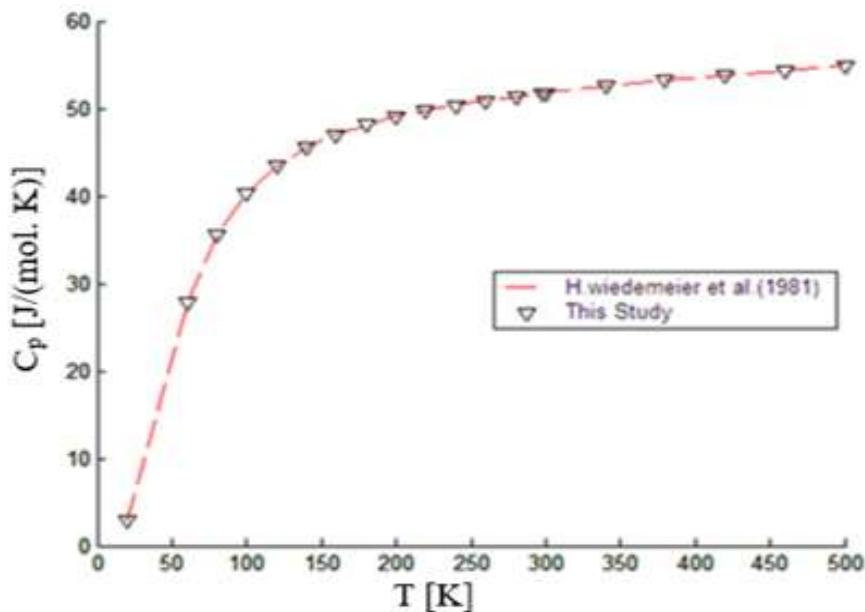
طبقت المعادلة (7) لحساب السعة الحرارية  $C_p$  لمركب شبه الموصل  $\text{SeSn}$  في مدى درجة الحرارة من  $K 20$  إلى  $K 500$  بالاستعانة ببرنامج بلغة MATLAB، وكذلك الاستعانة ببعض الخواص الفيزيائية المبنية في الجدول (1) لمادة البحث، وقد تمت مقارنة النتائج النظرية مع البيانات التجريبية التي تحصل عليها (Wiedemeier et al., 1981) والموضحة في الجدول (2) والشكل (2)، وهذا الجدول يوضح أن النتيجة التي تم الحصول عليها تتفق بشكل ممتاز مع القياسات المعملية عند كل درجات الحرارة، فكان أعلى تباين بنسبة 0.3% عند  $K 200$  و  $K 240$ . ولزيادة التأكيد على الطريقة المستخدمة في هذا البحث، تمت مقارنة الحسابات النظرية مع نتائج توصل إليها (Eser et al., 2011) بواسطة دوال ديبي ذات البعد ( $n$ -dimensional Debye functions) لمدى يمتد من  $K 20$  إلى  $K 500$ ، كما يوضحها الجدول (3)، ويبين هذا الجدول أن النتائج النظرية تتفق مع بعض بشكل ممتاز لجميع درجات الحرارة كما يبينها الشكل (3). وتمت أيضاً مقارنة الحسابات النظرية لمادة  $\text{Cp}$  في مدى درجة الحرارة من  $K 280$  إلى  $K 340$  مع القيم النظرية للسعة الحرارية  $\text{Cp}$  المحسوبة من قبل (Boussaid et al., 2019) باستخدام توزيع لا مبرت بولتزمان (Lambert distribution) كما هو موضح بالجدول (4) والشكل (4)، نلاحظ أن نتائج البحث تتطابق أيضاً وبشكل جيد جداً مع هذه النتائج.

ويوضح الشكل (5) مقارنة قيم السعة الحرارية  $\text{Cp}$  المحسوبة بواسطة قانون دي لوني مع البيانات التجريبية ودوال ديبي ذات البعد  $n$  وتوزيع لا مبرتبولتزمان، ويوضح هذا الشكل التوافق الكبير بينهم.

وهذا يؤكد أن قانون دي لوني المستخلص من قانون ديباي التكاملی قادر على تمثيل السعة الحرارية  $C_p$  بدقة.

جدول (2): مقارنة بين القياسات المعملية والقيم النظرية لـ  $C_p$  لمادة SnSe عند درجة حرارة ديباي K  $\cdot \theta_0 = 220$

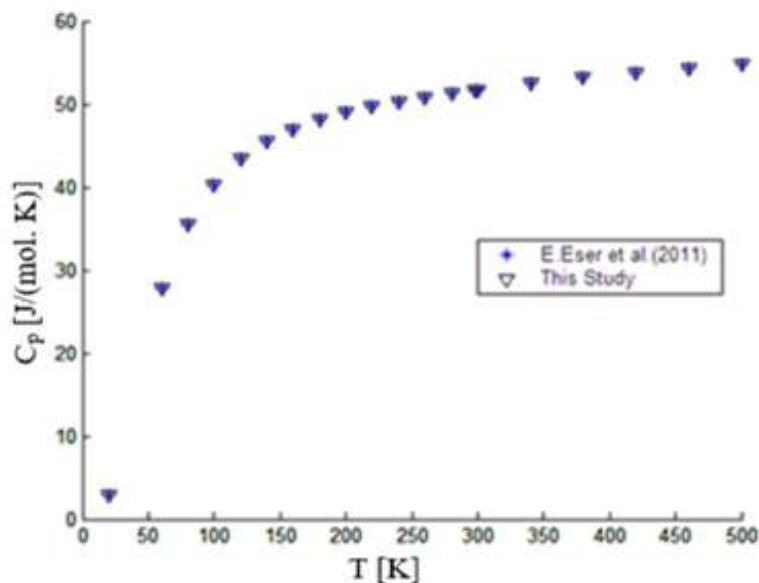
T [K]	This Study $C_p$ [J/(mol.K)]	H. Wiedemeier et al.,(1981) $C_p$ [J/(mol.K)]	Relative error
20.000	2.881	2.880	0.00035
60.000	27.853	27.850	0.00011
80.000	35.586	35.530	0.00158
100.00	40.334	40.350	0.00040
120.00	43.385	43.420	0.00081
140.00	45.464	45.520	0.00123
160.00	46.960	47.040	0.00170
180.00	48.090	48.030	0.00125
200.00	48.981	49.130	0.00303
220.00	49.709	49.650	0.00119
240.00	50.324	50.460	0.00270
260.00	50.856	50.950	0.00185
280.00	51.328	51.380	0.00101
298.15	51.716	51.760	0.00085
300.00	51.754	51.780	0.00050
340.00	52.508	52.510	0.00004
380.00	53.174	53.160	0.00026
420.00	53.783	53.780	0.00006
460.00	54.353	54.360	0.00013
500.00	54.896	54.930	0.00062



الشكل (2): مقارنة بين النتائج النظرية لقانون دي لوني والبيانات التجريبية للسعة الحرارية لمادة  $C_p$  لمادة SnSe

جدول (3): مقارنة بين نتائجنا النظرية لـ  $C_p$  والنتائج النظرية المحسوبة من قبل E. Eser et al. لمادة SnSe.

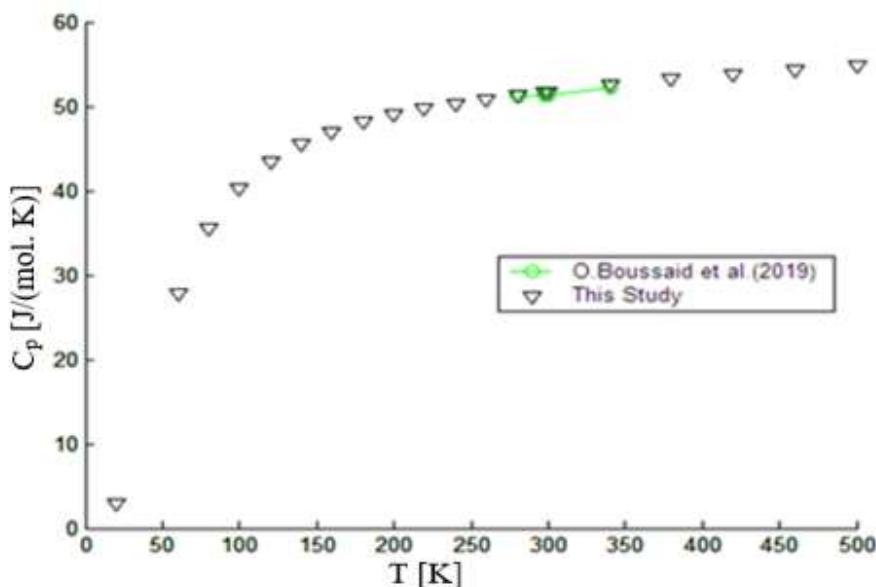
T [K]	This Study $C_p$ [J/(mol.K)]	E. Eser et al., (2011) $C_p$ [J/(mol.K)]	Relative error
20.000	2.881	2.880	0.00035
60.000	27.853	27.853	0
80.000	35.586	35.586	0
100.00	40.334	40.333	0.00002
120.00	43.385	43.385	0
140.00	45.464	45.463	0.00002
160.00	46.960	46.959	0.00002
180.00	48.090	48.090	0
200.00	48.981	48.981	0
220.00	49.709	49.709	0
240.00	50.324	50.323	0.00002
260.00	50.856	50.856	0
280.00	51.328	51.327	0.00002
298.15	51.716	51.716	0
300.00	51.754	51.753	0.00002
340.00	52.508	52.508	0
380.00	53.174	53.174	0
420.00	53.783	53.783	0
460.00	54.353	54.353	0
500.00	54.896	54.896	0



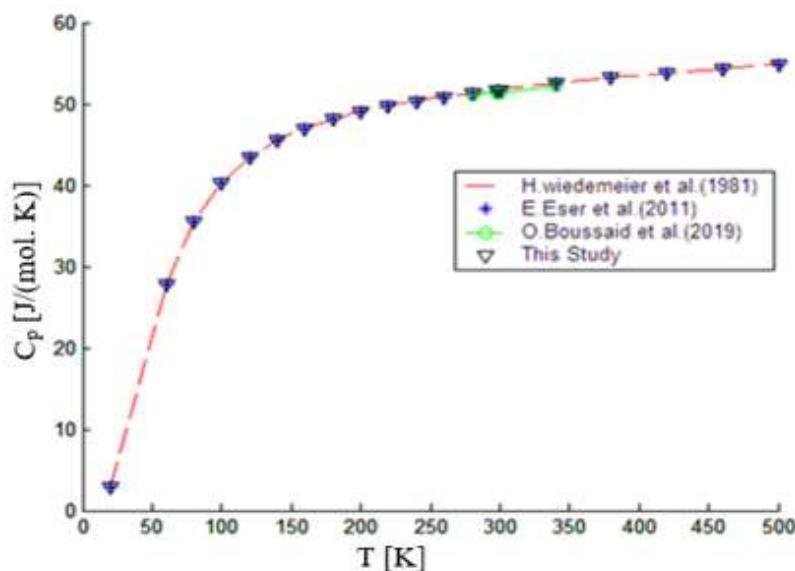
الشكل (3): مقارنة بين القيم النظرية لقانون دي لوني والقيم النظرية لدوال ديبابي ذات البعد n للسعة الحرارية  $C_p$  لمادة SnSe.

جدول (4): مقارنة بين النتائج النظرية لـ  $C_p$  والنتائج النظرية المحسوبة من قبل O. Boussaid et al. لمادة SnSe.

T [K]	This Study $C_p$ [J/mol.K]	O. Boussaid et al., (2019) $C_p$ [J/mol.K]	Relative error
20.000	2.881	-	-
60.000	27.853	-	-
80.000	35.586	-	-
100.00	40.334	-	-
120.00	43.385	-	-
140.00	45.464	-	-
160.00	46.960	-	-
180.00	48.090	-	-
200.00	48.981	-	-
220.00	49.709	-	-
240.00	50.324	-	-
260.00	50.856	-	-
280.00	51.328	51.180	0.00289
298.15	51.716	51.340	0.00732
300.00	51.754	51.370	0.00748
340.00	52.508	52.120	0.00744
380.00	53.174	-	-
420.00	53.783	-	-
460.00	54.353	-	-
500.00	54.896	-	-



الشكل (4): مقارنة بين النتائج النظرية لقانون دي لوني والقيم النظرية لدالة Lambert W للسعة الحرارية  $C_p$  لمادة SnSe



الشكل (5): مقارنة قيم السعة الحرارية  $C_p$  المحسوبة بواسطة قانون دي لوني مع البيانات التجريبية وتوزيع لا مبرت بولتزمان ودوال ديبابي ذات البعد n لمادة SnSe وذلك باستخدام برنامج MatLab الخاص.

## الخاتمة

في هذه الدراسة تمت مقارنة النتائج النظرية المحسوبة للسعة الحرارية  $C_p$  لمادة شبه موصلة SnSe التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة دي لوني المختزلة رياضياً المستبطة من نموذج ديباي مع القياسات المعملية التجريبية لـ (Eser Wiedemeier et al., 1981) ومع القيم النظرية التي قام (Debye et al., 2011) بإيجادها بواسطة  $n$ -dimensional Debye functions using binomial coefficients ومع القيم النظرية المحسوبة من قبل (Boussaid et al., 2019) باستخدام Lambert W Function لسعنة الحرارية عند ثبوت الضغط كدالة في درجة الحرارة المطلقة (T) باستخدام المحاكاة الحاسوبية قد أظهرت توافقاً كبيراً جداً.

## النوصيات

استخدام برنامج بلغة أخرى يقوم بحساب القيم النظرية للسعة الحرارية  $C_p$  لمادة البحث ومن ثم مقارنتها بالنتائج المستخرجة من البحث.

استخدام نموذج ديباي-اينشتاين لإيجاد القيم النظرية للسعة الحرارية  $C_p$  لمادة البحث ومقارنته نتائجه مع نتائج البحث.

استخدام العلاقة التي تم التوصل إليها في هذا البحث لتعيين القيم النظرية للسعة الحرارية  $C_p$  لمواد شبه الموصلة الأخرى.

## المراجع

### 1- المراجع العربية:

- بسمة الهادي الذيب ومحمد علي معتوق، "دراسة الحرارة النوعية المولية لبروميد الإيثايل الثقيل الصلب باستخدام نموذج ديباي"، رسالة ماجستير في الفيزياء الصلبة، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الزاوية، ليبيا، 2017م.
- يحيى نوري الجمال، "فيزياء الحالة الصلبة"، كلية العلوم، جامعة الموصل، الطبعة الثانية، 2000م.

- يسري مصطفى، "فيزياء الحالة الصلبة"، الجزء الأول، منشورات الدار الأكاديمية للطباعة والتأليف والترجمة والنشر، طرابلس، ليبيا، الطبعة الأولى، 2007م.

## 2-المراجع الأجنبية:

- Elkorashy. "Optical constants of tin selenide single crystals in the transparency region", Journal de Physique III, EDP Sciences, 1 (6), pp.1169-1179,1991.
- Okazaki, J. Phys. Soc. Japan 11, 479, 1956.
- Shafique & Y. H. Shin, "Thermoelectric and Phonon transport Properties of two dimensional IV-VI compounds", Scientific Reports, 7(1), 506, 2017.
- Bernardes-Silva, A.F. Mesquita, E. de Moura Neto, A.O. Porto, G.M. de Lima, J.D. Ardisson and F.S. Lameiras, "Tin selenide synthesized by a chemical route: the effect of the annealing conditions in the obtained phase", Solid State Communications 135, 677-682, 2005.
- Kittel Johnwiley & sons, "Introduction to solid state physics", 7th Edition, Inc, New York, U.S.A., 1996.
- Zhang, H. Yin, M. Han, Z. Dai, H. Pang, Y. Zheng, Y. Lan, J. Bao and J. Zhu, "Two-dimensional tin selenide nanostructures for flexible all-solid-state super capacitors", ACS Nano. 22;8(4):3761-3770, 2014.
- Eser, H. Koc, B. A. Mamedov and I. M. Askerov, "Estimation of the Heat Capacity of Some Semiconductor Compounds Using n-Dimensional Debye Functions", Ins J Thermophys 32: 2163-2169,2011.
- H. L. Schick, "Thermodynamics of Certain Refractory Compounds", V.1, Academic Press Inc, New York and London, U.S.A., 2013.
- H. Wiedemeier, G. Pultz, U. Gaur and B. Wunderlich, Thermochim. Acta43, 297,1981.
- J. Delaunay, "Solid state physics", Vol.2, F. Seitz and D. Turn Bull Eds., Academic Press, New York, 1956.
- K. M. Rabe& J. D. Joannopoulos. "Ab initio relativistic pseudopotential study of the zero- temperature structural properties of SnTe and PbTe", Phys Rev B. 32:2302-2314, 1985.
- L. D. Zhao, S. H. Lo, Y. Zhang, H. Sun, G. Tan, C. Uher, C. Wolverton, V. P. Dravid and M. G. Kanatzidis, "Ultralow thermal conductivity and high thermoelectric figure of merit in SnSe crystals". Nat., 508(7496), 373-377, 2014.

- M. M. Aliev, K. M. Mamedova and O.D. Dzhafarov, "Heat Capacity and Thermodynamic functions of SnSe", Available from Az. NHNTT, 16, 1987.
- M. Tannaranam, G. K. Solanki, K. D. Patel, V. M. Pathak and P. Pataniya, "Effect of off-stoichiometry on properties of tin selenide crystals", Indian Academy of Sciences, Bull. Mater. Sci. 42:79, 2019.
- N. W. Ashcroft & N.D. Mermin, "Solid state physics", Holt Rin, and Win., N.Y., 1976.
- O. Boussaid, Ch. H. Belgacem and M. Fnaiech, "Heat Capacity Calculation of Some Semiconductor Compounds Using Lambert W Function", Silicon 11:1673-1676, 2019.
- P. Passler, "Dispersion-related theory for heat capacities of semiconductors", Phys Status Solidi B. 244: 4605–4623, 2007.
- R. Carter , M. Suyetin, S. Lister, M. A. Dyson, H. Trewhitt, S. Goel, Z. Liu, K. Suenaga, C. Giusca, R. J. Kashtiban, J. L. Hutchison, J. C. Dore, G. R. Bell, E. Bichoutskaia and J. Sloan, "Band gap expansion, shear inversion phase change behaviour and low-voltage induced crystal oscillation in low-dimensional tin selenide crystals", Dalton Trans. 43, 7391-7399, 2014.
- R. W. G. Wyckoff, "Crystal Structures", Vol. 1 (New York: Interscience Publishers) 1963.
- S. Zhao, H. Wang, Y. Zhou, L. Liao, Y. Jiang, X. Yang, G. Chen, M. Lin, Y. Wang, H. Peng and Z. Liu, "Controlled synthesis of single-crystal SnSenanoplates". Nano Res. 8(1), 288-295, 2015.
- V. V. Zhdanova, Sov. Phys. Solid Stata 3, 1174, 1961.
- W. Nernst, A. F. Lindemann and Z. Elektrochem, "Spezifische Wärme und Quantentheorie", Angew Phys Chem. 17:817-827, 1911.
- Y. Xie, H. Su, B. Li and Y. Qian, "A direct solvothermal route to nanocrystalline selenides at low temperature", Material Research Bulletin 35, 459-464, 2000.