

تحديد درجة حرارة كيوري للمواد قاسية المغنطة بوساطة منحنيات Arrott

مرام خضور *

(تاريخ الإيداع 2021 /5/10 – تاريخ النشر 2022 /2 /20)

□ ملخص □

قمنا في هذا البحث بتحضير عينات من مركب الفرايت السداسي $BaFe_{12}O_{19}$ باستخدام الطريقة السيراميكية عند درجة حرارة $1150^{\circ}C$ لمدة $4h$ بطريقة تفاعل المحلول الصلب، ثم تم تشكيل حلقات من العينات الناتجة من أجل دراسة بعض خواصها المغنطيسية. تم هذا البحث تحديد درجة حرارة كيوري T_c للمواد قاسية المغنطة بوساطة منحنيات Arrott. وتعتبر منحنيات Arrott مناسبة لقياس T_c فقط للمواد اللامتائلة المناحي، حيث تم رسم مربع قيم المغنطة M^2 للعينات المدروسة كتابع للنسبة بين الحقل المغناطيسي المطبق H والمغنطة M أي بتابعية النسبة H/M عند درجات حرارة بجوار درجة حرارة كيوري المتوقعة. وتبين أن درجة حرارة كيوري لهذه المركبات تساوي $850^{\circ}C$ من أجل كلا الاتجاهين، السهل والصعب. كما وجد أن قيمة المغنطة تتعلق بدرجة الحرارة، حيث تتزايد المغنطة بتابعية الحقل المغناطيسي عندما يكون $T < T_c$ بشكل أسرع منه عندما يكون $T > T_c$.

كلمات مفتاحية : الفرايت السداسي – درجة حرارة كيوري – منحنيات Arrott – المغنطة.

*حاصلة على شهادة الماجستير، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة تشرين.

Determination of Curie temperature for hard magnetic materials by means of Arrott plots.

Maram khadoor*

(Received 10/5/2021.Accepted 20/2/2022)

□ABSTRACT □

In this study, we prepared samples of the hexagonal ferrite compound $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ by using the ceramic method at a temperature of 1150°C for 4h with the solid solution reaction method, then rings were formed from the resulting samples in order to study some of their magnetic properties. this study aims to determine the Curie temperature T_c for hard magnetic materials by Arrott plots. The Arrott plots for measurement T_c are suitable only for anisotropy materials, where we plot square of magnetization M^2 as a function of ratio between H and M, this means $\left(\frac{H}{M}\right)$ at temperatures near observed Curie temperature. And it turns out that the Curie temperature of these materials is equal to 850°C for both easy and hard direction. also found that the magnetization value is related to the temperature, as the magnetization increases with the continuity of the magnetic field when $T < T_c$ is faster than when it is $T > T_c$.

Key words: Hexagonal Ferrite - Curie temperature – Arrott plots – magnetization.

*master degree in solid state physics·physics department·faculty of science·tishreen university.

1- مقدمة:

درجة حرارة كيوري Curie temperature هي درجة حرارة تحول الطور من الدرجة الثانية من المواد الحديدية المغنطة Ferromagnetic إلى المواد الطردية المغنطة Paramagnetic حيث تلعب دوراً مهماً في المغناطيسية الدائمة إلى جانب تمغنط الإشباع والحقل القاهر والتمغنط المتبقي. والمقصود بالمغناط الدائمة أنها تستطيع أن تحافظ على مغنطتها لدى تعريضها مرة واحدة لحقل مغناطيسي حتى ولو أُنزعت عنها مغناطيسية مضادة عكسية فإنها لا تعود تتأثر بها. تتعلق درجة حرارة كيوري المحددة تجريبياً بنوع الطريقة المستخدمة حيث يتلاشى عندها التوضع المتوازي للعزوم (العزم المغناطيسي الذري) وعليه فإن T_C هي مقياس شدة الترابط المتبادل أو مقياس لترتيب العزوم، [1]

عند درجة حرارة كيوري تتلاشى المغنطة التلقائية، الأمر الذي يتطلب تحقق $H=0$ كشرط ثانوي غير أن القياسات المغناطيسية يتم إجراؤها عن طريق وجود شدة حقل معلومة. انطلاقاً من هذا التناقض أو الاختلاف فإن جميع الطرائق المتداولة والمعروفة غير كافية بمعنى آخر تحمل في طياتها أخطاءً. لذلك فإن الأسس النظرية للطريقة الجديدة تعتمد على نشر الطاقة الحرة في قوى زوجية بالنسبة للمغنطة، [2].

لتحديد درجة حرارة كيوري يمكن على سبيل المثال أن نرسم القيمة M^2 كتابع لـ H/m لدى درجات حرارة بجوار درجة حرارة كيوري المرتقبة أو المتوقعة. هذه الطريقة التي تم وصفها من قبل Arrott هي مناسبة فقط من أجل المواد اللامتائلة المناحي هذا يعني أن درجة حرارة كيوري المقاسة تتعلق باتجاه الحقل المغناطيسي المتعلق بمزايا الاتجاه (محور البلورة للبلورة أحادية التبلور، محور البلورة للبلورة متعددة التبلور)، [3].

2- أسس نظرية:

عند تعريض مادة فيرومغناطيسية لحقل مغناطيسي H فإن العزوم المغناطيسية لذراتها تكتسب طاقة مغناطيسية تتألف من الحدود التالية [4]:

١. طاقة Zeeman (E_z): وهنا يتم تحديد المغنطة M للعينة المدروسة، وبالتالي يمكننا إيجاد هذه الطاقة، ومن ثم القوة المغناطيسية للحقل التي تُعتبر قوة فتل للعزوم المغناطيسية: $E_z = \int \vec{M} \cdot \vec{H} dV -$ حيث V حجم المادة المغناطيسية المدروسة.

٢. طاقة التأثير المتبادل (E_{ex}): وهي طاقة تفاعل Spin-Spin ما بين السبينات المتجاورة وتعطى بالشكل: $E_{ex} = -J \sum_{\langle ij \rangle} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$ ، حيث أن J معامل الترابط المتبادل.

٣. طاقة اللاتماثل (E_{an} - Anisotropy energy): ترتبط هذه الطاقة بثوابت لاتماثل المناحي K_U ، وبالزاوية بين المحور السهل للتمغنط واتجاه التمغنط M . ويُعطى الحقل المغناطيسي غير المتماثل المناحي بالعلاقة التالية: $H_{an} = \frac{2K_U}{M_S}$ حيث M_S تمغنط الإشباع.

٤. حقل إزالة المغنطة ($-H_D$ Demagnetization Field): إن الحقل المغناطيسي المتولد عن الحافتين الخارجيتين للعينة يعاكس اتجاه المغنطة داخل العينة، ويرتبط H_D بتمغنط الإشباع M_S وعامل إزالة المغنطة N بالعلاقة: $H_D = N \cdot M_S$.

وبالتالي اعتماداً على الأسس النظرية لهذه الطريقة الجديدة، نقوم بنشر الطاقة المغناطيسية الحرة لبلورة وحيدة حديدية المغنطة في قوى زوجية بالنسبة للمغنطة، وذلك بالإعتماد على قاعدة LANDAU المعممة للطاقة المغناطيسية الحرة بجوار درجة حرارة كيوري T_C في الوسط غير متماثل المناحي، [5].

تُعطى كثافة الطاقة الحرة لبلورة وحيدة حديدية المغنطة بالعلاقة:

$$f = am^2 + bm^4 + k'_1 m_x^2 + k'_2 m_x^4 - \vec{M}\vec{H} + \frac{1}{2} \vec{M}\vec{N}\vec{M} \quad (3)$$

$\vec{H} = H_x \vec{e}_x + H_y \vec{e}_y$: الحقل المغناطيسي الخارجي.

\vec{N} : تنسور إزالة المغنطة.

a, b : تعرف بمتحولات Landau حيث:

$$b > 0$$

$$a = \alpha |T - T_C|^\beta \text{Sgn}(T - T_C) \quad ; (\alpha, \beta > 0).$$

حيث $m^2 = m_z^2 + m_x^2$: مركبتا المغنطة m_z, m_x العامودية والموازية للاتجاه البلوري السهل

على الترتيب. k'_1, k'_2 : ثابتا عدم تماثل المناحي، أي ثابتا الطاقة البلورية الحرة وهما تابعان للحرارة. حيث k'_2 غالباً ماتكون صغيرة جداً كما هو الحال في الفرايت القاسي على سبيل المثال، حيث يتم تعيين ثابتة عدم تماثل المناحي من العلاقة:

$$k'_1 = aM^n (n > 1)$$

تُعطى المغنطة الفعالة M بأخذ متوسط تمغنط كل الدومينات $\vec{M} = V^{-1} \int \vec{m} \cdot dV$.

ولدينا في البلورات الوحيدة: $M_x = m_x$.

$$= V^{-1} m_z (V \uparrow - V \downarrow) = m_z (2v - 1) \quad ; \quad v = V \uparrow / V$$

M_z

كما أن: $V \uparrow, V \downarrow$ تمثل الحجم الكلية للمجالات الصغيرة التي تدعى الدومينات. ومن ثم تصبح الطاقة

الحرة بالشكل:

$$f = am^2 + bm^4 + k'_1 m_x^2 + k'_2 m_x^4 - m_x H_x + \frac{1}{2} N_x m_x^2 - m_z (2v - 1) H_z + \frac{1}{2} N_z m_z^2 (2v - 1)^2 \quad (4)$$

حيث f كثافة الطاقة الحرة ، N_x عامل إزالة المغنطة للعينة في اتجاه المحور X

N_z عامل إزالة المغنطة للعينة في اتجاه المحور Z

حيث k'_2 و k'_1 ثوابت الطاقة البلورية الحرة وهما تابعان للحرارة .

يمكننا تحديد مركبات المغنطة ونسبة الحجم v بالعلاقة التالية:

$$\frac{\partial f}{\partial m_x} = \frac{\partial f}{\partial m_z} = \frac{\partial f}{\partial v} = 0 \quad ; (v \leq 1) \quad (5)$$

$$0 \leq \frac{\partial^2 f}{\partial m_x^2} \quad , \quad 0 \leq \frac{\partial^2 f}{\partial m_z^2} \quad (6) \quad \text{حيث:}$$

$$0 \leq \frac{\partial^2 f}{\partial v^2}$$

بما أن هذه المعادلات لا يمكن أن تُحل من أجل أي اتجاه للحقل، فقد قيدنا أنفسنا بالحقول المغناطيسية الموازية للاتجاه السهل والحقول المغناطيسية العمودية عليه:

أولاً: من أجل الاتجاه السهل، أي: $\vec{H} = H_z \vec{e}_z$ نجد من (4) و (5):

$$(2v-1) = \frac{H_z}{N_z m_z} ; (v \leq 1)$$

ونجد أيضاً عندما يكون $H_z = N_z m_z$

$$4bm_z^2 + (2a + N_z) = \frac{H_z}{m_z}$$

بينما من أجل الحقل الصغيرة القيمة $H_z \ll N_z m_z$ نجد:

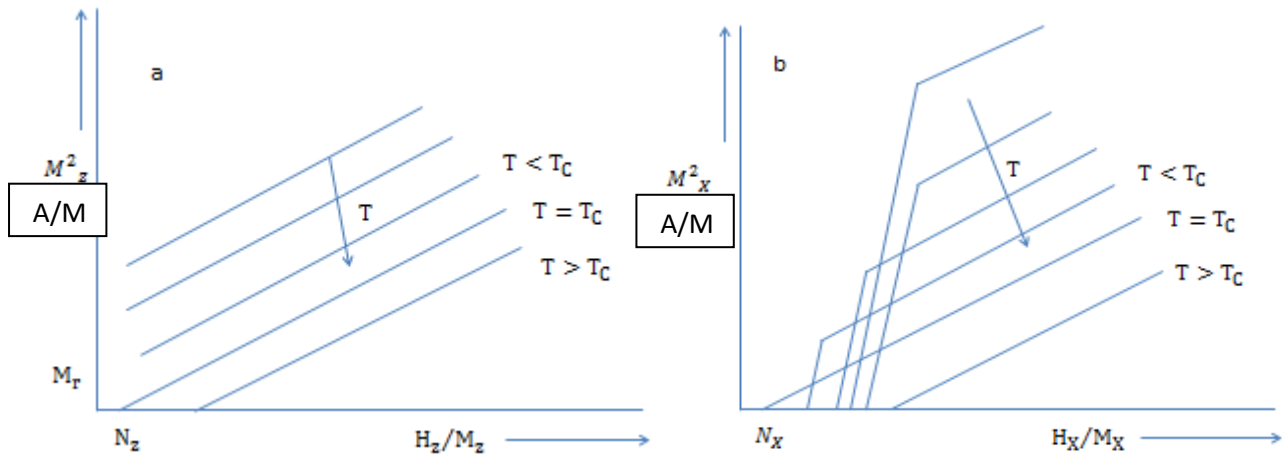
$$m_z (2a + 4bm_z^2) = 0 \quad (7)$$

ونجد عندها الحالة طردية المغنطة $a > 0$ ، $T \geq T_c$ ، $m_z = 0$ وفي الحالة الحديدية المغنطة يكون:

$$m_z = \sqrt{\frac{-a}{2b}} \text{ ولكن الكمية المقاسة ليست } m_z \text{ وإنما } M_z = (2v - 1) m_z \text{ حيث:}$$

$$M_z = \frac{H_z}{N_z} : \text{ for } H_z \geq N_z m_z \quad (8)$$

نجد من العلاقتين (7) و (8) مربع المغنطة M^2 بتابعية النسبة H/M_z (منحنيات Arrott) المبينة في الشكل /1a/، الذي يبين ازدياد المغنطة بازدياد الحقل المغناطيسي المطبق. كما يظهر أن قيمة المغنطة الناتجة عند درجات حرارة أخفض من درجة حرارة كيوري أكبر منها عند درجات حرارة أعلى من درجة حرارة كيوري، وذلك بسبب الانتقال الطوري بين الطورين الفيرو والبارا مغناطيسي عند هذه الدرجة من الحرارة. كما نلاحظ اختلاف قيم المغنطة الناتجة وفق الاتجاه الموازي للمحور السهل الشكل /1a/ والاتجاه المعامد للمحور السهل الشكل /1b/ وذلك بسبب خاصية عدم تماثل المناحي في هذه العينات.



الشكل (1): يبين المخطط النظري لمربع المغنطة بتابعية النسبة H/M ، أي $M^2 = f(H/M)$ من أجل حقول موازية للاتجاه السهل /1a/، وحقول عمودية على الإتجاه السهل /1b/، [6].

لتطوير النظرية يمكننا الأخذ بالحسبان تفاعلات جدران الدومينات المتبادلة مع عيوب الشبكة، من خلال إدخال تمغنط متبقي صغير M_r في المعادلة (8) السابقة، وذلك إذا بدأنا القياس من الحالة المشبعة)، فيصبح لدينا:

$$\frac{H_z}{M_z} = \frac{H_z}{H_z/N_z + M_r}, \quad M_z = \frac{H_z}{N_z} + M_r \quad (9)$$

ثانياً: من أجل الاتجاه الصعب (المعاقد للمحور السهل)، أي: $\vec{H} = H_x \vec{e}_x$ نجد باشتقاق (4) بالنسبة لـ u أن $v = 1/2$. ثم باشتقاقها بالنسبة لـ m_x نجد:

$$2(a + K'_1 + \frac{1}{2}N_x) + 4bm_x^2 + 4K'_2 m_x^2 = \frac{H_x}{m_x} \quad (10)$$

ثم باشتقاقها بالنسبة لـ m_z نجد:

$$(2a + 4bm_z^2)m_z = 0 \quad (11)$$

و بما أن $m_z \neq 0$ تكون محققة فقط من أجل $T < T_c$ ، و $m_x^2 < m^2$ ، بالتالي نجد:

$$m_z^2 = -a/2b \quad (12)$$

$$m_x^2 = \frac{1}{(4K'_2)} \left(\frac{H_x}{m_x} - 2K'_1 - N_x \right)$$

تعود المعادلة (12) للعالمين المشهورين Sucksmith-Thompson.

من أجل $N_x = N_z$ يتزامن ذلك بأخذ $T \geq T_c$ في المعادلتين (7) و (11) إذا أهملت ثوابت تباين المناحي. وبالتالي يمكن أن تُحدد درجة حرارة كيوري من تقاطع هذه الخطوط مع المحور الأفقي عند قيمة معينة لدرجة الحرارة أي عندما يكون $m_x^2 = 0$ أو $m_z^2 = 0$ عند $\frac{H_x}{m_x} = N_x$ أو $\frac{H_z}{m_z} = N_z$ على التوالي.

3- أهمية البحث وأهدافه:

إن تحديد درجة حرارة كيوري للمواد الفيرومغناطيسية لها أهمية كبيرة من الناحية النظرية ومن الناحية العملية وذلك لدى استخدام المواد الصناعية، أو لأغراض معايرة أجهزة القياس المغناطيسية لأنها تصف الحد الأعلى المسموح به لاستخدام المواد الصناعية [7]. لذلك فإن هذا البحث يهدف إلى:

1- تحضير مركب الفرايت السداسي $BaFe_{12}O_{19}$ باستخدام الطريقة السيراميكية وذلك بخلط الأكاسيد المغناطيسية وغير المغناطيسية اعتماداً على النسب المولية الوزنية حسب تكافؤ المركب.

2- حساب المغنطة M الناتجة في هذا المركب عند تطبيق حقل مغناطيسي H عليه، وتحديد المغنطة M_z الناتجة في الاتجاه الموازي للمحور السهل، والمغنطة M_x الناتجة في الاتجاه العمودي على المحور السهل.

3- رسم مخططات Arrott لهذا المركب، أي رسم العلاقة بين مربع المغنطة M^2 بتابعية نسبة الحقل إلى المغنطة $\frac{H}{M}$.

4- تحديد درجة حرارة كيوري T_c لهذه المواد بواسطة Arrott plots وذلك برسم القيمة M^2 بتابعية $\frac{H}{M}$. إذا الشيء الجديد الذي سيوضع هو إجراء قياسات ضمن درجات حرارة متساوية وحساب المغنطة بتابعية شدة الحقل.

4- العمل التجريبي:

تحضير العينات:

حضّرنا مركب الفريت السداسي $BaFe_{12}O_{19}$ باستخدام الطريقة السيراميكية التي تعتمد على خلط الأكاسيد المغناطيسية وغير المغناطيسية اعتماداً على النسب المولية الوزنية حسب تكافؤ المركب، حيث قمنا بطحن كمية من مركبي أكسيد الحديد Fe_2O_3 و أكسيد الباريوم BaO في جفنة خاصة حتى الوصول إلى درجة عالية من النعومة، ثم قمنا بخلط 6 mol من مسحوق أكسيد الحديد Fe_2O_3 ، و 1mol من مسحوق أكسيد الباريوم BaO ، وذلك بإضافة الماء المقطر إلى مخلوط المساحيق في بيشر ثم يُوضع هذا البيشر على خلاط مغناطيسي Stirrer لمدة أربع ساعات حتى يجف المسحوق ثم يُطحن المسحوق مرة ثانية لتحضير طور الفريت السداسي $BaFe_{12}O_{19}$ المطلوب.

بعد ذلك، يُجرى للمسحوق المُحضّر في كل مرحلة عملية التكليل عند الدرجة $900^{\circ}C$ في فرن كهربائي لمدة أربع ساعات. وأخيراً، يُوضع المخلوط داخل الفرن عند الدرجة $1150^{\circ}C$ لمدة أربع ساعات كي نحصل على المركب الخاص بالدراسة، ثم تُبرّد العينة إلى درجة حرارة الغرفة داخل الفرن بمعدل هبوط $80^{\circ}C/h$. بعد ذلك، تُشكّل من المسحوق الناتج حلقات (Toroids) باستخدام مكبس ميكانيكي يدوي بغية دراسة الخواص المغناطيسية علماً أن القطر الداخلي للحلقة $ID=10mm$ وقطرها الخارجي $OD=20mm$ وسماكتها $4mm$.

5- النتائج والمناقشة:

في البداية، قمنا بتحديد النفاذية المغناطيسية النسبية μ_r للعينة المحضّرة باستخدام جهاز LCR وذلك بعد لف عدداً من اللفات قدره $N=100$ لفة من سلك نحاسي قطره $1mm$ على الحلقة المحضّرة. يُعطي جهاز LCR قيم التحريضية L للعينة المدروسة. ويمكننا الحصول على التحريضية من العلاقة: [8,9]

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 d}{\pi} \log\left(\frac{OD}{ID}\right)$$

حيث أن: d سماكة الحلقة، OD قطرها الخارجي، ID قطرها الداخلي، μ_0 النفاذية المغناطيسية للخلاء. وعند إجراء النسبة بين قيمة التحريضية بوجود المادة L وقيم التحريضية بدون وجود المادة L_0 أي $\mu_r = 1$ نجد $\mu_r = \frac{L}{L_0}$ ونحصل على الطواعية المغناطيسية χ للمادة، وبالتالي يمكن حساب المغنطة M للمادة المدروسة بواسطة العلاقات الآتية عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي H: [10]

$$M = \chi H \quad , \quad \chi = \mu_r - 1$$

وبالتالي تمكّننا من حساب مربع المغنطة ونسبة المغنطة إلى الحقل المغناطيسي من أجل الاتجاه الموازي للمحور السهل، والاتجاه المعامد للمحور السهل، وحصلنا على النتائج الموضحة بالجدول (1) من أجل الاتجاه الموازي للمحور السهل عند درجات حرارة مختلفة، أمّا من أجل الاتجاه العمودي على المحور السهل فقد حصلنا على النتائج الموضحة بالجدول (2) عند درجات حرارة مختلفة:

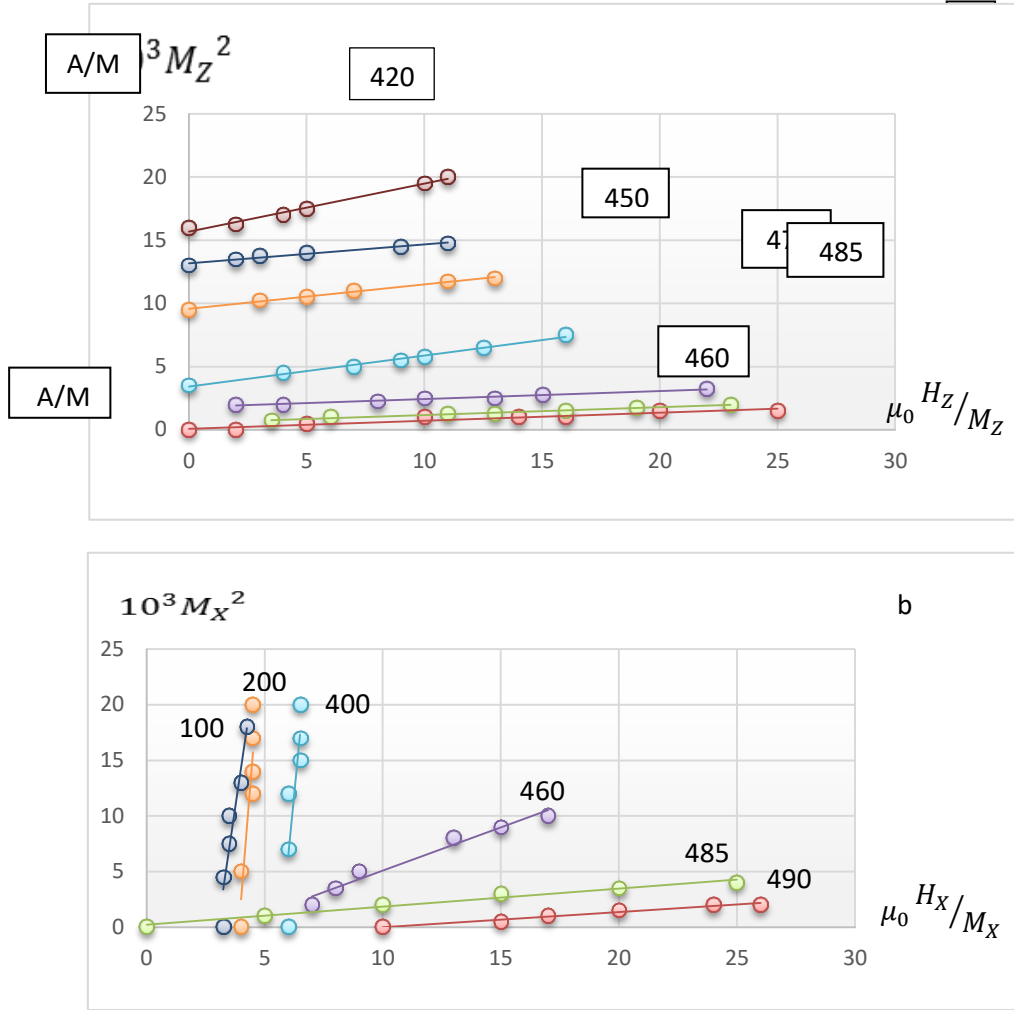
الجدول (1): قيم مربع المغنطة ونسبة المغنطة إلى الحقل المغنطيسي من أجل الاتجاه الموازي للمحور السهل عند درجات حرارة مختلفة:

$T = 485 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	0	2	5	10	14	16	20	25
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	0	4	25	100	196	256	400	625
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	0	0.25	0.5	1	1	1	1.5	1.5
$T = 470 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	3.5	6	11	13	16	19	23	
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	12.25	36	121	169	256	361	529	
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	0.75	1	1.25	1.25	1.5	1.75	2	
$T = 460 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	2	4	8	10	13	15	22	
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	4	16	64	100	169	225	484	
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	2	2	2.25	2.5	2.5	2.75	3.25	
$T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	0	4	7	9	10	12.5	16	
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	0	16	49	81	100	156.25	256	
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	3.5	4.5	5	5.5	5.75	6.5	7.5	
$T = 440 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	0	3	5	7	11	13		
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	0	9	25	49	121	169		
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	9.5	10.25	10.5	11	11.75	12		
$T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	0	2	3	5	9	11		
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	0	4	9	25	81	121		
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	13	13.5	13.75	14	14.5	14.75		
$T = 420 \text{ }^\circ\text{C}$	$M_Z (\times 10^3)$	0	2	4	5	10	11		
	$M_Z^2 \text{ (A/M)}$	0	4	16	25	100	121		
	$\mu_0(H_Z/M_Z)$	16	16.25	17	17.5	19.5	20		

الجدول (2): قيم مربع المغنطة ونسبة المغنطة إلى الحقل المغنطيسي من أجل الاتجاه العمودي على المحور السهل عند درجات حرارة مختلفة:

$T = 490\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M_X (\times 10^3)$	10	15	17	20	24	26
	$M_X^2 (\text{A/M})$	100	225	289	400	576	676
	$\mu_0(H_X/M_X)$	0	0.5	1	1.5	2	2
$T = 485\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M_X (\times 10^3)$	0	5	10	15	20	25
	$M_X^2 (\text{A/M})$	0	25	100	225	400	625
	$\mu_0(H_X/M_X)$	0	1	2	3	3.5	4
$T = 460\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M_X (\times 10^3)$	7	8	9	13	15	17
	$M_X^2 (\text{A/M})$	49	64	81	169	225	289
	$\mu_0(H_X/M_X)$	2	3.5	5	8	9	10
$T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M_X (\times 10^3)$	6	6	6	6.5	6.5	6.5
	$M_X^2 (\text{A/M})$	36	36	36	42.25	42.25	42.25
	$\mu_0(H_X/M_X)$	0	7	12	15	17	20
$T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M_X (\times 10^3)$	4	4	4.5	4.5	4.5	4.5
	$M_X^2 (\text{A/M})$	16	16	20.25	20.25	20.25	20.25
	$\mu_0(H_X/M_X)$	0	5	12	14	17	20
$T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$M_X (\times 10^3)$	3.25	3.25	3.5	3.5	4	4.25
	$M_X^2 (\text{A/M})$	10.5625	10.5625	12.25	12.25	16	18.0625
	$\mu_0(H_X/M_X)$	0	4.5	7.5	10	13	18

ويمكن توضيح نتائج الجدولين السابقين بالشكل (2):



الشكل (2): يبين المخطط التجريبي لمربع المغنطة بتابعة النسبة H/M ، أي $M^2 = f(H/M)$ من أجل حقول موازية للاتجاه السهل /2a/، وحقول عمودية على الإتجاه السهل /2b/.

إنّ المستقيم الذي يمر بالمبدأ هو المستقيم الذي تتحقق من أجله درجة حرارة كيوري والتي تساوي كما هو ملاحظ من النتائج التجريبية 485°C ، و من أجل درجات حرارة أقل من T_C تبقى المادة في الطور الفيرومغناطيسي، وتتحول إلى الطور البارامغناطيسي بعد هذه الدرجة من الحرارة.

6- الاستنتاجات و التوصيات:

- من هذه الدراسة توصلنا إلى الاستنتاجات التالية :
- ١- يمكن تحضير عينات من مركب الفرايت السداسي $BaFe_{12}O_{19}$ عند التكليل بدرجة حرارة $900^{\circ}C$ في فرن حراري لمدة 4h.
 - ٢- بيّنت مخططات آروت أن المغنطة في الاتجاه الموازي للمحور السهل Z أي M_z تزداد ببطء كما يبين الشكل (2-a) وتتنخفض قيم المغنطة كلما ازدادت درجة الحرارة.
 - ٣- كما بيّنت المخططات أن المغنطة في الاتجاه العمودي على المحور السهل Z أي M_x تزداد بشكل كبير من أجل درجات الحرارة المنخفضة نسبياً $(100-200-400)^{\circ}C$ بينما تتزايد ببطء من أجل درجات الحرارة العالية $(460-485-490)^{\circ}C$.
 - ٤- وُجد أنّ درجة حرارة كيوري للعينة المدروسة هي $485^{\circ}C$ عند قياسها من أجل كلا الاتجاهين، الموازي للمحور السهل والعمودي على المحور السهل، كما هو واضح في الشكل (2).
 - ٥- إن إمكانية الاستفادة من نوعي المواد حديدية المغنطة (المواد اللينة والقاسية المغنطة)، واستخدامها في صناعة الحديد اللين والمغانط الدائمة نظراً لأهمية مركبات الفرايت في العديد من الصناعات والمجالات. يتطلب المزيد من الدراسة.

الجدول (3): درجة حرارة كوري للمغانطيسية الحديدية والطرديّة لكل من الحديد، الكوبالت والنيكل [8] .

كوبالت	حديد	نيكل	
1393	1043	631	T_c / K
1428	1093	650	θ / K

الجدول (4) :درجة حرارة كوري لمغانط قاسية من الكريستالات الأحادية والمتعددة التبلور (من الرسم البياني).

درجة حرارة كوري		التركيب الكيميائي
$\vec{H} \perp \vec{C}$	$\vec{H} \parallel \vec{C}$	
$485^{\circ}C$	$485^{\circ}C$	$BaFe_{12}O_{19}$
$442^{\circ}C$	$442^{\circ}C$	الباريوم فيريت (MANI PERM)

References

[1] DOBIS,P;BARTLOVA,M.*Curie Temperature in Ferromagnetic Materials and Visualized Magnetic Domains*.3rd,International Symposium for Engineering Education, Ireland,2010.

[2] FABIAN,K; SHCHERBAKOV, V.P ;MCENROE,S.A. *Measuring the Curie temperature*. Geochem geophys geosyst America,Vol.14,No.4,2013,pp947-961.

[3] HADIMANI, R. L.; MELIKHOV, Y.; SNYDER, J. E.; JILES. *Determination of Curie temperature by Arrott plot technique in $Gd_{5-x}Ge_{1-x}$ for $x>0.575$* . Journal of Magnetism and Magnetic Materials UK.Vol.320,No.20,2008,pp696–698.

[4] ZHIPENG,G;CHENFJIA,L;YUHANG,W.*Super Stable Ferroelectrics with High Curie point*.Scientific Reports. Vol.47,2016,pp81-86 .

[5] RAFIQ,M;COSTA,E.*Pairing High Pizeoelectric Coefficients,d33,with High Curie temperature(T_C) in Lead-Free (k-Na) NbO_3* .ACS Publications.Vol.49,No.8,2016,pp33755-33764.

[6] AHMED,A;RAMANUJAN,R.*Curie temperature controlled self-healing magnet-polymer composites*.Journal of Materials Research. Vol.30,No.7,2015,pp946-958.

[7] MARSHALL,R;EDMONDS,K;CAMPION,R.*Determining Curie temperatures in dilute ferromagnetic semiconductors: highcurie temperature (Ga,Mn) As*.Applied physics letters. Vol.104,2014,pp1077-3118.

[8] ZIYA,A;IBRAHIM,A;ATIQ,SH;KHAN,S.*Enhancement of Curie temperature T_C And Magnetization of Fe-Ni Invar alloy Through Cu Substitution and with He^{+2} Ion Irradiation*.Journal of Electronic Materials.Vol.45,No.4,2016,pp2258-2265.

[9] KUKRETI,A;KUMAR,A;NAITHANI,U.*Electric Field Dependence of Curie Temperature in $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ Ferroelectric Perovskites*.Indian Journal of pure and Applied Physics India.Vol.49,2011,pp126-131.

[10] MING,CH;LI,Z. *Ferroelectric Transition and Curie–Weiss Behavior in Some Filled Tungsten Bronze Ceramics*.chinphys Lett China. Vol.31,No.1,2014,pp77-80.