

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة منتوري - قسنطينة -  
كلية العلوم الدقيقة  
قسم الفيزياء

رقم التسجيل 036 / Mag / 2008

السلسلة 004 / Phy / 2008

### مذكرة

مقدمة لنيل شهادة  
الماجستير في الفيزياء  
تخصص: علوم المواد  
فرع: الخزفيات

### العنوان

دراسة التسخين بأموج الميكرو (2.45 GHz)  
تطبيق في تحضير الأكاسيد

من طرف

عواجة فيصل

تاريخ المناقشة 2008/01/26

أمام أعضاء لجنة المناقشة

جامعة قسنطينة  
جامعة قسنطينة  
جامعة قسنطينة  
جامعة قسنطينة

رئيسا  
مقررا  
ممتحنا  
ممتحنا

أستاذ  
أستاذ محاضر  
أستاذ  
أستاذ محاضر

عبد الحميد حرابي  
محمد الطاهر بن لحرش  
سليمان عاشور  
زين الدين ويلي

# الفهرس

1 ..... مقدمة

## الفصل الأول: عموميات حول موجات الميكرو

3	1-I تعريف موجات الميكرو
3	2-I النظرية الكهرومغناطيسية
4	3-I التجهيزات
4	1.3-I منابع موجات الميكرو
4	1.1.3-I المغنترونات
6	1.1.1.3-I نظام بريلوان، شروط الانقطاع
7	2.1.1.3-I مبدأ عمل حجرات الرنين (التجاوب)
9	2.1.3-I أنابيب تجوال الموجة
10	2.3-I خطوط التوصيل وموجهات موجات الميكرو
14	3.3-I عناصر التقويم والضبط
14	1.3.3-I ماص الإشعاع المنعكس
14	4.3-I مطبقات موجات الميكرو وأنظمة المعالجة
14	1.4.3-I المطبقات أحادية النمط
16	2.4.3-I المطبقات متعددة الأنماط

## الفصل الثاني : دراسة التسخين بموجات الميكرو

21	1-II آلية التسخين بموجات الميكرو
21	1.1-II الاستقطاب
23	2.1-II الاسترخاء العزلي
29	3.1-II الخواص العزلية
30	4.1-II شدة الحقل الكهربائي الداخلي
31	5.1-II تحول الطاقة
34	6.1-II الأطوار
34	7.1-II نظام العزل الحراري
35	8.1-II التسخين الهجين
36	9.1-II قياس الخواص العزلية
37	2-II تطبيقات التسخين بموجات الميكرو
37	1.2-II عمل داركور وفريقه
37	1.1.2-II العمل المنجز
37	2.1.2-II العمل التجريبي المتبع

38	.....	3.1.2-II أهم النتائج المتحصل عليها
42	.....	2.2-II عمل كساي وفريقه
42	.....	1.2.2-II العمل المنجز
42	.....	2.2.2-II العمل التجريبي المتبع
43	.....	3.2.2-II أهم النتائج المتحصل عليها
46	.....	3.2-II عمل فال وفريقه
46	.....	1.3.2-II العمل المنجز
46	.....	2.3.2-II العمل التجريبي المتبع
48	.....	3.3.2-II أهم النتائج المتحصل عليها
51	.....	4.2-II عمل فازكونسيلوس وفريقه
51	.....	1.4.2-II العمل المنجز
51	.....	2.4.2-II العمل التجريبي المتبع
52	.....	3.4.2-II أهم النتائج المتحصل عليها

### الفصل الثالث: الطرق التجريبية المتبعة والأجهزة المستعملة

55	.....	1-III فرن موجات الميكرو.....
56	.....	2-III التعديلات المدخلة على فرن موجات الميكرو.....
56	.....	1.2-III انتزاع الطبق الدوار ومحركه الكهربائي.....
56	.....	2.2-III تثبيت حامل المزدوج الحراري.....
57	.....	3-III صناعة المزدوج الحراري.....
57	.....	4-III صناعة وتركيب حامل المزدوج الحراري وحمائته البلاطينية.....
57	.....	1.4-III الطريقة الأولى.....
58	.....	1.1.4-III نقائص الطريقة الأولى.....
59	.....	1.1.1.4-III أسباب اضطراب قياس درجة الحرارة وتلف المزدوج الحراري.....
61	.....	2.4-III الطريقة الثانية.....
63	.....	5-III منظومة التسخين بموجات الميكرو.....
63	.....	1.5-III مكونات منظومة التسخين.....
63	.....	2.5-III صناعة منظومة التسخين.....
63	.....	1.2.5-III صناعة عناصر التسخين.....
70	.....	2.2.5-III صناعة نظام العزل الحراري.....
71	.....	3.2.5-III تحضير نظام العزل الحراري لدراسة أثره على التسخين.....
75	.....	6-III تحضير عينات تيتانات الباريوم - أكسيد الحديد ( $BaTiO_3-Fe_2O_3$ ).....
76	.....	7-III تقنيات التحليل والقياس.....
76	.....	1.7-III التحليل باستعمال أشعة X.....
76	.....	2.7-III قياس الكتلة الحجمية.....
77	.....	3.7-III قياس نسبة التليد.....
77	.....	4.7-III قياس ثابت العزل النسبي وزاوية فقدان العازلية.....
77	.....	8-III أهم الأجهزة المستعملة.....
79	.....	1.8-III الفرن.....
79	.....	2.8-III الميزان.....
79	.....	3.8-III البالمر.....

79	..... 4.8-III جهاز حيود الأشعة السينية
79	..... 5.8-III جهاز الكبس

## الفصل الرابع : النتائج ومناقشتها

80	..... 1-IV اختبار ودراسة تأثير ضغط الكبس
83	..... 2-IV اختبار ودراسة تأثير نوعية وصنف الـ SiC الصناعي على التسخين
83	..... 1.2-IV اختبارات التسخين
86	..... 2.2-IV دراسة الخواص العزلية
86	..... 1.2.2-IV دراسة ثابت العزل
87	..... 1.2.2-IV دراسة زاوية فقدان العزلية
87	..... 1.2.2-IV دراسة معامل فقدان العزلية
90	..... 3-IV تأثير الإضافات
90	..... 1.3-IV تأثير إضافة أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) في عملية التسخين
91	..... 1.1.3-IV اختبارات التسخين
94	..... 2.1.3-IV دراسة الخواص العزلية
94	..... 1.2.1.3-IV دراسة ثابت العزل
94	..... 2.2.1.3-IV دراسة زاوية فقدان العزلية
95	..... 3.2.1.3-IV دراسة معامل فقدان العزلية
98	..... 4-IV دراسة تأثير درجة حرارة تلييد عناصر التسخين في تسخينه
99	..... 1.4-IV إختبارات التسخين
101	..... 2.4-IV دراسة الخواص العزلية
101	..... 1.2.4-IV دراسة ثابت العزل
101	..... 2.2.4-IV دراسة زاوية فقدان العزلية
102	..... 3.2.4-IV دراسة معامل فقدان العزلية
104	..... 3.4-IV دراسة الخواص العزلية لكربيد السليكون المخبري الملبد عند درجات حرارة مختلفة
104	..... 1.3.4-IV دراسة ثابت العزل
105	..... 2.3.4-IV دراسة زاوية فقدان العزلية
105	..... 3.3.4-IV دراسة معامل فقدان العزلية
108	..... 5-IV دراسة تأثير تصميم نظام العزل الحراري في التسخين بموجات الميكرو
108	..... 1.5-IV دراسة تأثير اتساع نظام العزل الحراري
110	..... 2.5-IV دراسة تأثير سمك نظام العزل الحراري
	..... 6-IV دراسة تأثير تغير استطاعة موجات الميكرو المكافئة في تسخين المنظومة سسبينتور/عازل حراري
113	.....
113	..... 1.6-IV التغذية المستمرة بـ 100 % من الاستطاعة لقصوى
114	..... 1.6-IV التغذية المتقطعة بـ 80 % من الاستطاعة لقصوى
115	..... 1.6-IV التغذية المتقطعة بـ 60 % من الاستطاعة لقصوى
117	..... 1.6-IV التغذية المتقطعة بـ 40 % من الاستطاعة لقصوى
118	..... 1.6-IV التغذية المتقطعة بـ 20 % من الاستطاعة لقصوى
122	..... 7-IV دراسة تدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين
127	..... 8-IV تحضير الأكاسيد
127	..... 1.8-IV تحضير المركب $BaTiO_3-Fe_2O_3$

127	.....	1.1.8-IV	دراسة الكثافة والأطوار
132	.....	2.1.8-IV	دراسة الخواص العزلية
132	.....	1.2.1.8-IV	دراسة ثابت العزل النسبي
134	.....	2.2.1.8-IV	دراسة زاوية فقدان العزلية
136	.....		الخلاصة

## مقدمة

تعتبر المعالجة بموجات الميكرو، أحد أهم التطبيقات الحديثة والهامة في معالجة المواد، وخاصة الخزفية منها. حيث أخذ الاهتمام، يتزايد على دراسة واستخدام التسخين بموجات الميكرو، لمعالجة المواد، مع بداية الثمانينات وخاصة الخزفية منها. وهذا لما له من ميزات إيجابية، أهمها تقليص أزمنة المعالجة والاقتصاد في الطاقة مقارنة بالطرق التقليدية. كما أن التسخين بموجات الميكرو، تعطي سرعة تكثيف أكبر للخزفيات الملبدة، وبخصائص أحسن ( ميكانيكية ، كهربائية ). في المعالجة بموجات الميكرو يتم تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية، إلى طاقة حرارية، على عكس المعالجة التقليدية، التي يتم فيها تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية . هذا الاختلاف في الطريقة التي يتم التزود فيها بالطاقة، ينتج عنه العديد من الفوائد في معالجة المواد باستعمال موجات الميكرو. لكون موجات الميكرو، تخرق المادة وتودع الطاقة بها ، يمكن للحرارة أن تتولد في الحجم بأكمله ، فالتحول الطاقوي في هذه الحالة، لا يعتمد على انتشار الحرارة من السطوح . وبالتالي يمكن الوصول إلى تسخين متجانس وسريع في المواد السميكة. في المعالجة التقليدية غالبا تستعمل سرعات تسخين بطيئة، يتم اختيارها للتقليل من التدرجات الحرارية الحادة، التي ينتج عنها إجهادات داخل المادة . من أجل الخزفيات ، التي تعتبر مواد ذات ناقلية حرارية منخفضة ، يمكن أن ينتج عن ذلك زيادة في أزمنة المعالجة وبالتالي غالبا ما يكون هناك توازن بين زمن المعالجة وجودة المنتج في الطريقة التقليدية. بما أن موجات الميكرو، تنتقل الطاقة إلى الحجم برمتها في آن واحد، فإنه يصير بالإمكان تقليص زمن المعالجة وتحسين الجودة. بالإضافة إلى أن موجات الميكرو، تعمل على التسخين الحجمي للمواد فإنه يمكن لتحويل الطاقة، على المستوى الجزيئي، أن يكون له ميزات إيجابية أخرى. فموجات الميكرو يمكن استعمالها في التسخين الانتقائي للمواد. إن البنية الجزيئية تؤثر على مقدرة موجات الميكرو في التفاعل مع المواد وتحويل الطاقة. عندما توصل المواد ذات الخواص العزلية المختلفة ببعضها ، فإن موجات الميكرو تتزاوج مع المادة الأكثر فقدان لعازليتها، هذه الظاهرة المتمثلة في التسخين الانتقائي ، يمكن استغلالها في العديد من الأغراض. كتلحيم الخزفيات والبوليمر، حيث يضيع في اللحام التقليدي للخزفيات والبوليمر زمن معتبر وطاقة معتبرة أيضا في تسخين الحد البيني، عن طريق الحمل الحراري عبر حوامل العينات. مع موجات الميكرو حد اللحام البيني، يمكن أن يسخن في موضعه، بدمج مادة ذات فقدان عالي للعازلية فيه. في المواد متعددة الأطوار ، يمكن لبعض الأطوار أن تتزاوج بشكل أسرع مع موجات الميكرو ، فيصير بالإمكان معالجة المواد ذات بني مجهرية جديدة عن طريق التسخين الانتقائي لأطوار مميزة.

تهدف دراستنا، إلى تحضير عناصر تسخين، قادرة على الوصول إلى درجات حرارة عالية، مع تسخين متجانس داخلها . مع فهم آلية التسخين بموجات الميكرو، وأهم العوامل المؤثرة فيه ، ثم في الأخير استغلال منظومة التسخين المنجزة، في معالجة المركبات الخزفية ( $BaTiO_3-Fe_2O_3$ ) .

تنقسم دراستنا إلى قسمين، حيث:

القسم الأول: عبارة عن دراسة نظرية، وهو يضم فصلين. نتطرق في الفصل الأول، إلى مفاهيم عامة حول موجات الميكرو، وكيفية استغلالها في تطبيقات معالجة المواد بشكل عام. أما الفصل الثاني، فنتطرق فيه أولاً، إلى آلية التسخين بموجات الميكرو، وأهم العوامل المؤثرة في التسخين بموجات الميكرو، ثم بعد ذلك نتطرق إلى تطبيقات التسخين بموجات الميكرو، حيث نتطرق فيه إلى بعض أعمال بعض الباحثين، حيث نستعرض الطرق التجريبية المتبعة ومنظومات التسخين المستعملة، مع ذكر أهم النتائج التي توصلوا إليها، وكذلك تفسيراتهم للتسخين بموجات الميكرو.

القسم الثاني: تمت فيه دراسة تجريبية في فصلين. تم في الفصل الأول، طريقة تصميم منظومة التسخين المستعملة في الدراسة، بدءاً من التعديلات المدخلة، على فرن موجات الميكرو وطريقة صناعة وتركيب المزدوج الحراري وحامله المعدني إلى طريقة تحضير وتشكيل عناصر التسخين (السببوتور) المستعملة في دراسة التسخين بموجات الميكرو، وهذا باستخدام الجملة سببوتور – عازل حراري، مع تقديم شرح مفصل لطرق التركيب والتصميم، وذكر المشاكل المواجهة وحلولها إن وجدت. كما يتطرق هذا الفصل إلى الطرق التجريبية المتبعة في تحضير العينات، وأهم الأجهزة المستخدمة في عملية التحضير والتحليل.

أما الفصل الثاني، فنتطرق فيه إلى نتائج اختبارات التسخين، التي أنجزت على مختلف عناصر التسخين. مع محاولة تقديم تفسير للظاهرة، وأسباب الاختلافات الموجودة بينها، وتأثير الخواص العزلية لمادة عنصر التسخين على عملية التسخين بموجات الميكرو لهذه الأخيرة، كما نتطرق في هذا الفصل، إلى التأثير الذي تلعبه بعض الأبعاد بطريقة أو بأخرى ككثافة عنصر التسخين، تأثير تصميم نظام العزل الحراري، التغذية المتقطعة بإستطاعات خروج مختلفة لموجات الميكرو (تأثير شدة الحقل)، وتدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين (تأثير توزيع الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة التسخين). وينتهي الفصل باستغلال منظومة التسخين، في تلييد عينات من تيتانات الباريوم  $BaTiO_3$ ، مضاف إليها نسب مختلفة من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$ ، لنقوم بدراسة خصائص المركب الناتج (الكثافة، الأطوار، الخواص العزلية)، ومقارنتها مع النتائج التي حصلنا عليها بالمعالجة التقليدية.

## الفصل الأول : عموميات حول موجات الميكرو

### 1-I تعريف موجات الميكرو

موجات الميكرو، هي أمواج تنتمي إلى طيف الأمواج الكهرومغناطيسية، وهي ذات ترددات محصورة بين 300 ميغا هرتز و300 جيجا هرتز، توافق أطوال موجة ما بين 1 متر إلى 1 ملليمتر وهي تتواجد بين ترددات أمواج الراديو (RF) وتحت الحمراء (IR). يتضمن هذا المجال من الطيف الكهرومغناطيسي، ترددات تستخدم في الهواتف، الرادار و الأقمار الاصطناعية للاتصالات التلفزيونية وأفران التسخين بموجات الميكرو. موجات الميكرو يمكن أن تنعكس، تنتقل أو تمتص؛ طاقة موجات الميكرو الممتصة تتحول داخل المادة إلى حرارة. الغازات، السوائل والمواد الصلبة يمكن أن تسخن عند تفاعلها مع موجات الميكرو، كما أن الغازات يمكن أن تحث بموجات الميكرو، لتشكل البلازما وهذا تحت شروط معين [1].

### 2-I النظرية الكهرومغناطيسية :

يخضع التحليل النظري، لانتشار موجات الميكرو، عبر مختلف الأوساط إلى الشروط الحدية ومعادلات ماكسويل [2]:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1.I)$$

$$\nabla \cdot D = r \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J ,$$

حيث: E، يمثل شعاع الحقل الكهربائي، H، شعاع الحقل المغناطيسي، D، شعاع كثافة التدفق الكهربائي، B، شعاع كثافة التدفق المغناطيسي، J، شعاع كثافة التيار وρ، كثافة الشحنة. تمثل معادلات ماكسويل القوانين الفيزيائية التي تصف الحقول الكهرومغناطيسية المتغيرة مع الزمن. إن طراز منابع موجات الميكرو، خطوط التوصيل وموجهات الأمواج، المطبقات، ومقدار التنسيق بين هذه العناصر لبناء نظام فعال لمعالجة المواد يتطلب معرفة وفهم جيد للنظرية الكهرومغناطيسية.

**3-I التجهيزات :**

- العناصر الأساسية التي تشتمل عليها الأفران العاملة بموجات الميكرو هي :
- 1- منابع و مولدات موجات الميكرو ، التي تحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة موجات الميكرو.
  - 2- خطوط التوصيل و موجهات الموجات، التي تضمن تحويل طاقة موجات الميكرو من منابع ومولدات موجات الميكرو إلى المطبقات.
  - 3- عناصر التقويم والضبط، والتي تضمن حماية لمعدات موجات الميكرو ( منابع موجات الميكرو).ومعالجة متجانسة و فعالة للمواد.
  - 4- حجرة التطبيق أو المطبق، والذي من خلاله يتم تحويل طاقة الموجات إلى المواد المراد معالجتها.

**I- 1.3-1 منابع موجات الميكرو :**

إن توليد الإشعاع الكهرومغناطيسي، ينتج عن تسارع للشحنة، لبلوغ الاستطاعة العالية والترددات المطلوبة للتسخين بموجات الميكرو .أغلبية المنابع ،عبارة عن أنابيب مفرغة من الهواء ، بعض الأنابيب المفرغة، التي استعملت في التسخين بموجات الميكرو هي عبارة عن مغنترونات ، كلاسيترونات ، أنابيب تجوال الموجة وجيرترونات .

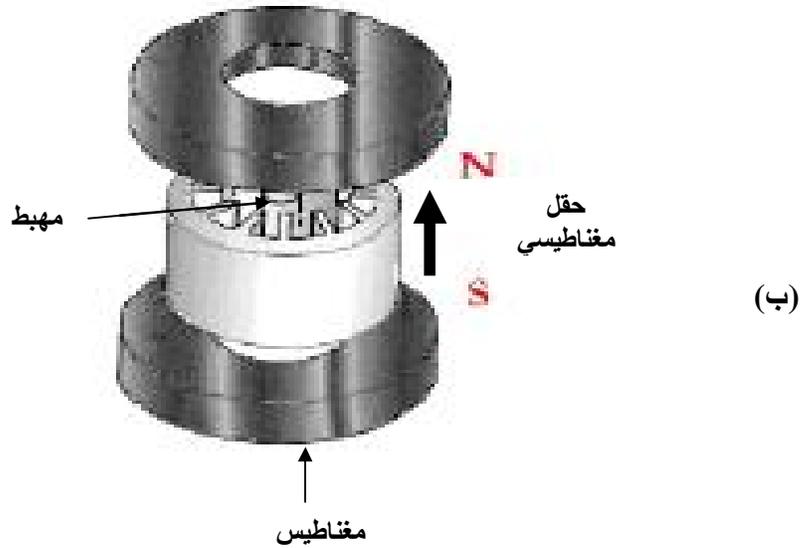
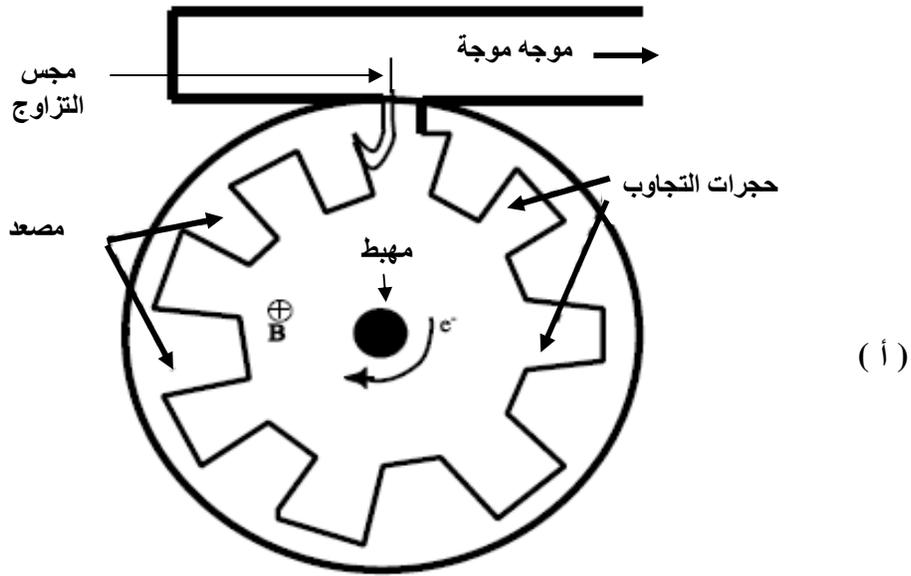
تعتبر المغنترونات المستعملة في أفران موجات الميكرو المنزلية فعالة وموثوقة [3]. بسبب أن المغنترونات تنتج بكثرة وبسهولة من أي منبع آخر للموجات ، فهي المنبع المتوفر بأخفض كلفة .

لإنتاج الحقل الكهرومغناطيسي ، تستعمل المغنترونات بنى الرنين (التجاوب) وبالتالي فهي الوحيدة القادرة على توليد حقل كهرومغناطيسي ذو تردد محدد(ثابت). في موجات الميكرو ذات التردد المتغير ، تستخدم أنابيب تجوال الموجة (TWT) في توليد الحقل الكهرومغناطيسي. أما الكلاسيترونات فهي تستعمل لإنتاج إشعاع كهرومغناطيسي، ذو استطاعة عالية جدا تبلغ في المتوسط 50 كيلو واط وتصل إلى قيمة 50 ميغا واط وهي تستعمل في ميادين الاتصالات ، الطب و الرادار، خاصة [1].

**I- 1.1.3-1 المغنترونات :**

المغنترونات هي عبارة عن أنابيب مفرغة، على شكل دائري متجانس، تتمثل في مهبط معدني في المحور المركزي للأنبوب ومصعد على شكل أسطواني مجوف حول المحيط الخارجي .المهبط هو في الغالب ،عبارة عن حلزون من التنغستان، في حين أن المصعد عادة مصنوعة من النحاس وتتمثل في مجموعة من الحجرات الرنانة محيطة بالمهبط . يكون المصعد عند كمون عالي مقارنة بالمهبط ، يولد فرق الكمون الحاصل حقلًا كهربائيًا قويًا . ويسخن المهبط لقلع إلكترونات التكافؤ الطليقة ثم تسرع باتجاه المصعد

بواسطة الحقل الكهربائي . يستعمل مغناطيس خارجي في المغنترون (شكل-I-1) عمودي على الحقل الكهربائي، ويخلق الحقل المغناطيسي المطبق، قوة دورانية في الإلكترونات وهي تتسارع نحو المصعد، تجعل هذه القوة الإلكترونات، تتجول في اتجاه لولبي وهذا يخلق سحابة دوامة من الإلكترونات. بما أن الإلكترونات تعبر حجرات الرنين، فإن هذه الحجرات تجعل سحابة الإلكترونات تهتز، ويتعلق تردد الاهتزازات بحجم الحجرات. [4]



الشكل-I-1 : مخطط توضيحي لأنبوب موجات الميكرو للمغنترون ( أ ) منظر علوي، (ب) منظر جانبي

[4].

للتحكم في معدل طاقة خروج أنابيب المغنترونات ، تستعمل طريقتان بشكل شائع، إما عبر ضبط دورة العملية ، أو بضبط تيار المهبط أو قوة الحقل المغناطيسي . في أفران موجات الميكرو المنزلية ، يشغل المغنترون بأقصى استطاعته. أثناء وقت محدد، يغلَق ويفتَح التيار لأجزاء من الدورة، وبالتالي متوسط (معدل) الاستطاعة يخفض [5]. هذا النوع من التحكم القائم على الفتح والغلق (فتح/غلق)، غالبا ما يتعلق بوظيفة التحكم بالدورة. إذا تطلب استعمال موجات الميكرو ذات استطاعة مستمرة، فإن استطاعة خروج أنبوب المغنترون، تغيّر بتعديل شدة تيار المهبط أو بتغيير شدة الحقل المغناطيسي. يسمح هذا بتحكم متغير لاستطاعة موجات الميكرو في المجال الذي يتيح المنبع.

### I-1.1.1.3 : نظام بريلوان (Brillouin) ، شروط الانقطاع :

إذا كانت قوة الحقل المغناطيسي، مرتفعة بشكل كبير، الإلكترونات المقترعة من المهبط لا تصل إلى المصعد، نقول حينئذ بأننا في حالة الانقطاع ويكون مسار الإلكترونات في هذه الظروف، دائرة ممرزة في محور الأسطوانة (نظام بريلوان). تكون القيم  $E_0$  (المرتبطة بالكمون الكهروستاتيكي  $V_0$ ) و  $B_0$  للحقلين الكهربائي والمغناطيسي، هي التي تسمح بتأسيس هذا النظام. سنعمل في الإحداثيات الأسطوانية  $(\rho, \theta, z)$  وبجعل التقريب لهندسة أسطوانية محكمة تماما. أي لنفرض أن

$$B_{0q} = 0 \quad B_{0r} = 0, \quad \frac{\partial V_0}{\partial q} = 0, \quad \frac{\partial V_0}{\partial z} = 0,$$

نتجاهل التنافر بين الإلكترونات، في هذه الحالة نحصل على المعادلة التالية

$$\begin{aligned} m \dot{\mathbf{a}} &= q \dot{\mathbf{E}}_0 + q \dot{\mathbf{v}} \times \mathbf{B}_0 \\ &= e \left( \mathbf{E}_0 + \dot{\mathbf{v}} \times \mathbf{B}_0 \right) \end{aligned}$$

التي تصبح في الإحداثيات الأسطوانية كالتالي

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - r \left( \frac{\partial q}{\partial t} \right)^2 &= \frac{e}{m} \left( \frac{\partial V_0}{\partial r} - r \frac{\partial q}{\partial t} B_{0z} \right) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial t} \left( r^2 \frac{\partial q}{\partial t} \right) &= \frac{e}{m} \frac{\partial r}{\partial t} B_{0z} \end{aligned}$$

تعرف نبض لامور (Lamor) بـ  $w_L \equiv \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_{0z}$  ، نعرف شعاع المهبط ،  $r_K$  شعاع المصعد و  $V_A$

كمون المصعد. ولنفترض أن الإلكترونات ليست بعد في دوران عندما اقتلعوا من المهبط نحصل على

$$\left. \frac{\partial q}{\partial t} \right|_{r=r_K} = 0 \Rightarrow \frac{\partial q}{\partial t} = w_L \left( 1 - \frac{r_K^2}{r^2} \right)$$

وبالتعويض في المعادلة السابقة نحصل على المعادلة

$$\frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + r w_L^2 \left( 1 - \frac{r_K^4}{r^4} \right) = \frac{e}{m} \frac{\partial V_0}{\partial r}$$

بالتكامل بعد ضرب طرفي المعادلة في  $2 \frac{\partial r}{\partial t} \partial t$  نحصل

$$\left( \frac{\partial r}{\partial t} \right)^2 = \frac{2e}{m} V_0(r) - w_L^2 r^2 \left( 1 - \frac{r_K^2}{r^2} \right)^2$$

ومن أجل شرط الانقطاع  $\left. \frac{\partial r}{\partial t} \right|_{r=r_K} = 0$  ، يصبح لدينا

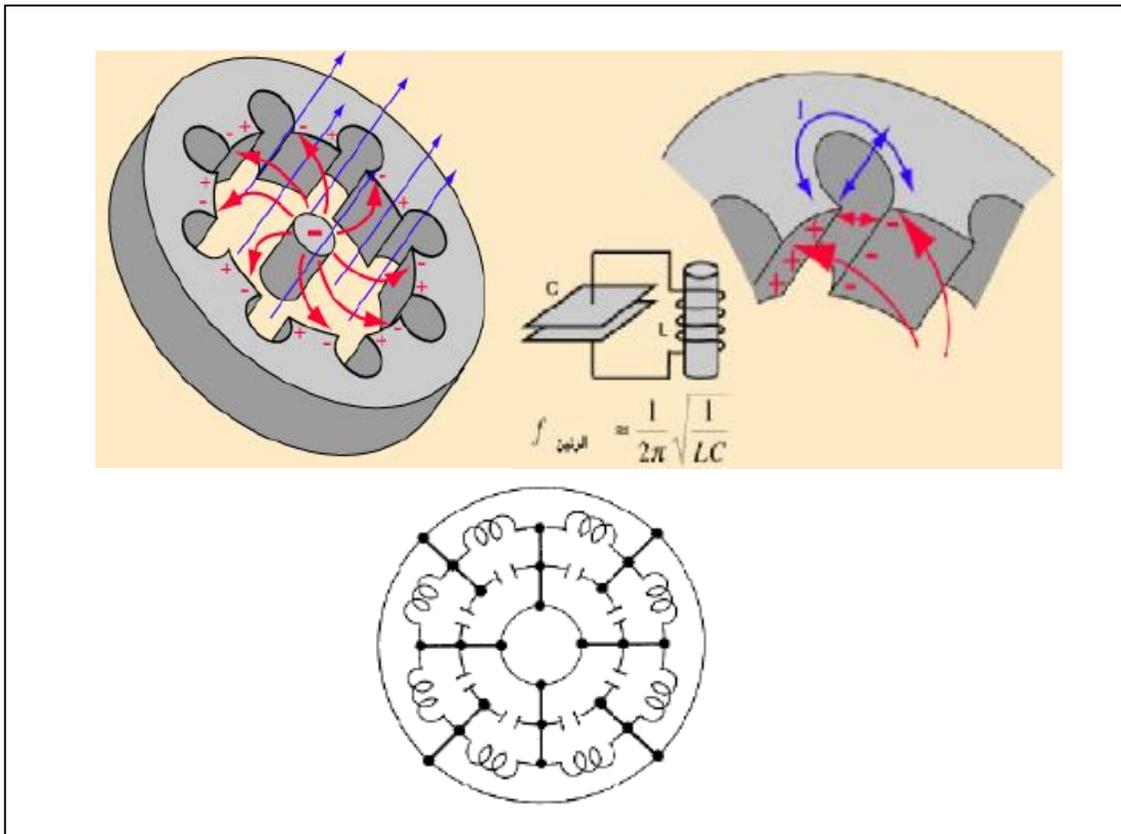
$$\frac{2e}{m} V_0(r_A) = \frac{2e}{m} V_{r_A} = w_L^2 r_A^2 \left( 1 - \frac{r_K^2}{r_A^2} \right)^2$$

وعبارة الحث المغناطيسي  $B_c$  التي من أجله يحدث الانقطاع

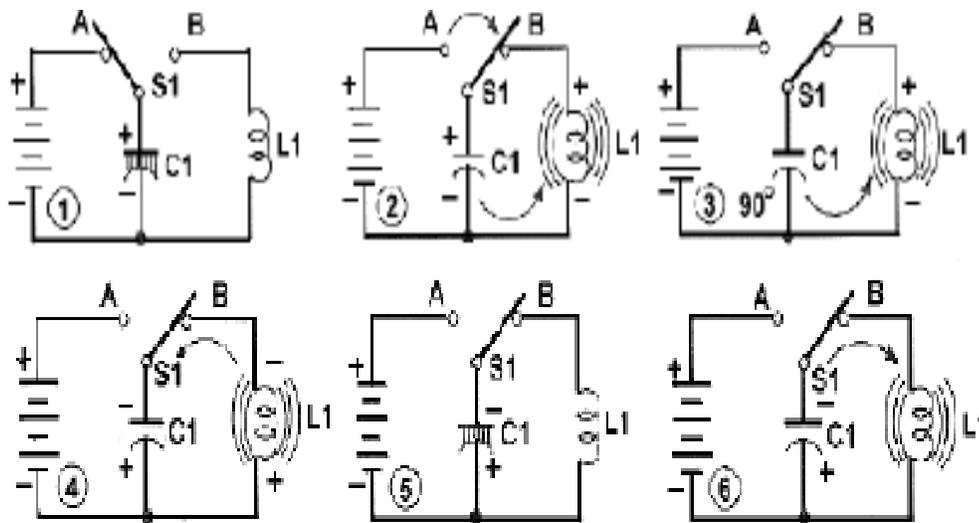
$$B_c = \frac{2 \sqrt{\frac{2m}{e}} \frac{\sqrt{V_A}}{r_A}}{1 - \frac{r_K^2}{r_A^2}} \quad (2.1)$$

### I-2.1.1.3 مبدأ عمل حجرات الرنين (التجاوب) :

يمكن توضيح مبدأ عمل حجرات الرنين، بالدارة الموافقة لهذه الحجرات و الممثلة في الشكل I-2 حيث يوضح الشكل I-3 طريقة عمل الدارة الموافقة لحجرة الرنين. حيث أنه خلال المرحلة (1) عندما يصل التدفق إلى حافة الحجرة، ينتقل القاطع إلى الوضعية (A) حيث يربط المكثف والمنبع ، وتنشأ طاقة تشحن المكثف. (2-3) ينتقل كل من التدفق والقاطعة إلى الوضعية (B)، بذلك يكون المكثف في مرحلة تفريغ نحو الوشيعية ، هذه الأخيرة تستقبل الطاقة وتخلق حقل كهرومغناطيسي، مطابق إلى الحقل RF المنتج من طرف الحجرة.(4) بعد أن يفرغ المكثف ينشأ تيار لإعادة شحنه من جديد ، هذا التيار الذي يرفق بتغير في القطبية.(5) يشحن المكثف من جديد.(6) ينشأ تيار نحو الوشيعية ، والذي يكون مرفوقا بنشوء حقل ، لتعاد العملية من جديد طيلة عمل حجرة الرنين.



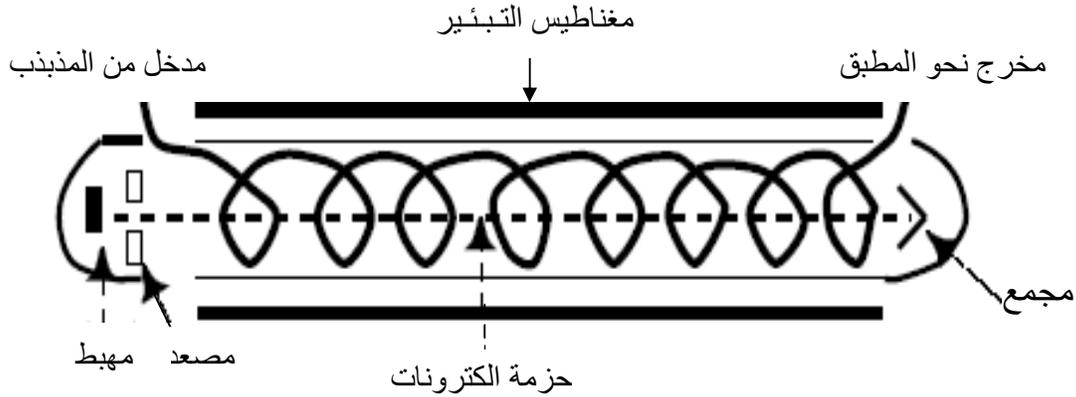
الشكل I-2 حجرات التجاوب و الدارة الموافقة لها.



الشكل I-3 مبدأ عمل الدارة الموافقة لحجرات التجاوب.

**2.1.3-I أنابيب تجوال الموجة :**

تستعمل أنابيب تجوال الموجة، عالية الاستطاعة في أجهزة موجات الميكرو ذات التردد المتغير على خلاف المغنترونات ، أين يستعمل الأنبوب لخلق تردد الإهتزازات و تضخيم الإشارة معا فأنابيب تجوال الموجة، يستعمل للتضخيم فقط . يولد هزاز ذو جهد متحكم فيه إشارة موجة الميكرو . يتحكم جهد الدخول في تردد الإهتزازات و تبعث الإشارة إلى أنابيب تجوال الموجة أين تضخم [6] . لأن الهزاز يحدد موجة الميكرو، فهذا النوع من المنابع قادر على تبديل تردد الخروج بسرعة .

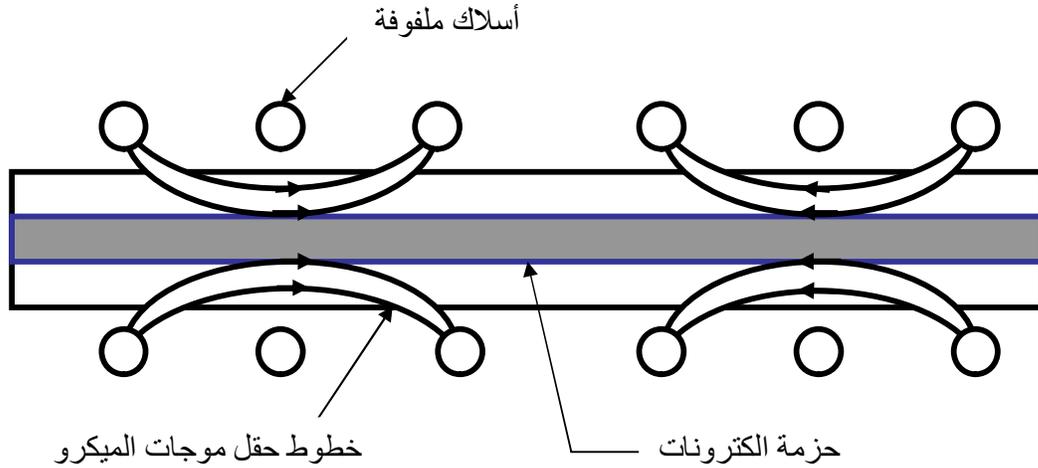


**الشكل 4-I:** مخطط توضيحي لأنبوب تجوال الموجة

يتكون أنبوب تجوال الموجة، (شكل 4-I) من عنصرين أساسيين هما: مدفع إلكتروني وخط التوصيل الحلزوني (اللولبي). بسبب غياب بنى التجاوب في هذه الأنابيب، يصير بإمكانها تضخيم ترددات واسعة التغير (نطاق التمرير) بالأنبوب نفسه . يرسل المهبط المسخن، سيل من الإلكترونات التي تسرع باتجاه المصد وتبار بواسطة حقل مغناطيسي خارجي . يهدف السلك اللولبي إلى تبطيئ سرعة طور موجات الميكرو (السرعة باتجاه محور اللولب ) وجعلها تساوي تقريبا سرعة حزمة الإلكترونات. تنتشر على طول السلك اللولبي ومقدار تباعد لفات السلك يحدد سرعة طور الموجة [7].

عندما تنتشر إشارة موجات الميكرو، على امتداد السلك اللولبي ، فإن المركبة المحورية للحقل الكهرومغناطيسي، تتفاعل مع الحزمة الإلكترونية (شكل 5-I) . ينتج عن هذا تسارع وتباطؤ الإلكترونات داخل الحزمة . ولكي يحصل تضخيم للإشارة، يجب أن تتمتع إلكترونات الحزمة بسرعة أعلى بقليل من

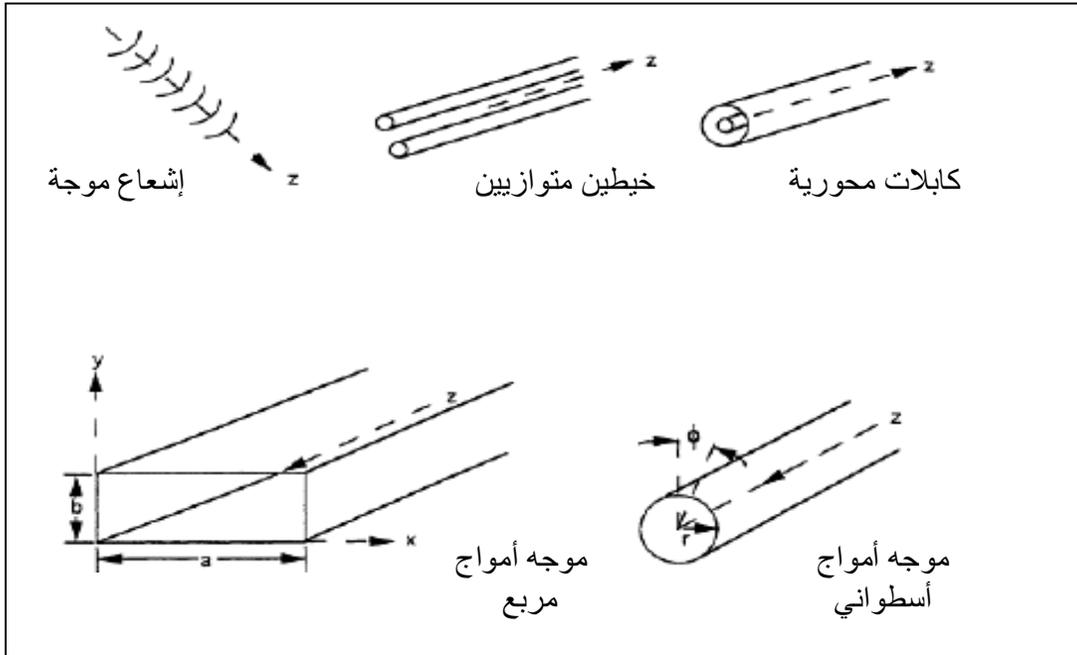
سرعة طور موجة الميكرو، السارية في السلك اللولبي . في هذه الحالة ، عدد كبير من الإلكترونات سيتسارع ويتباطأ. وبالتالي تضخم الإشارة، لان الطاقة تتحول من حزمة الألكترونات إلى حقل موجة الميكرو [8].



الشكل-5-I : تفاعل حقل موجات الميكرو مع حزمة الكترونات في أنبوب تجوال الموجة [7].

### 2.3-I خطوط التوصيل و موجات موجهات الميكرو :

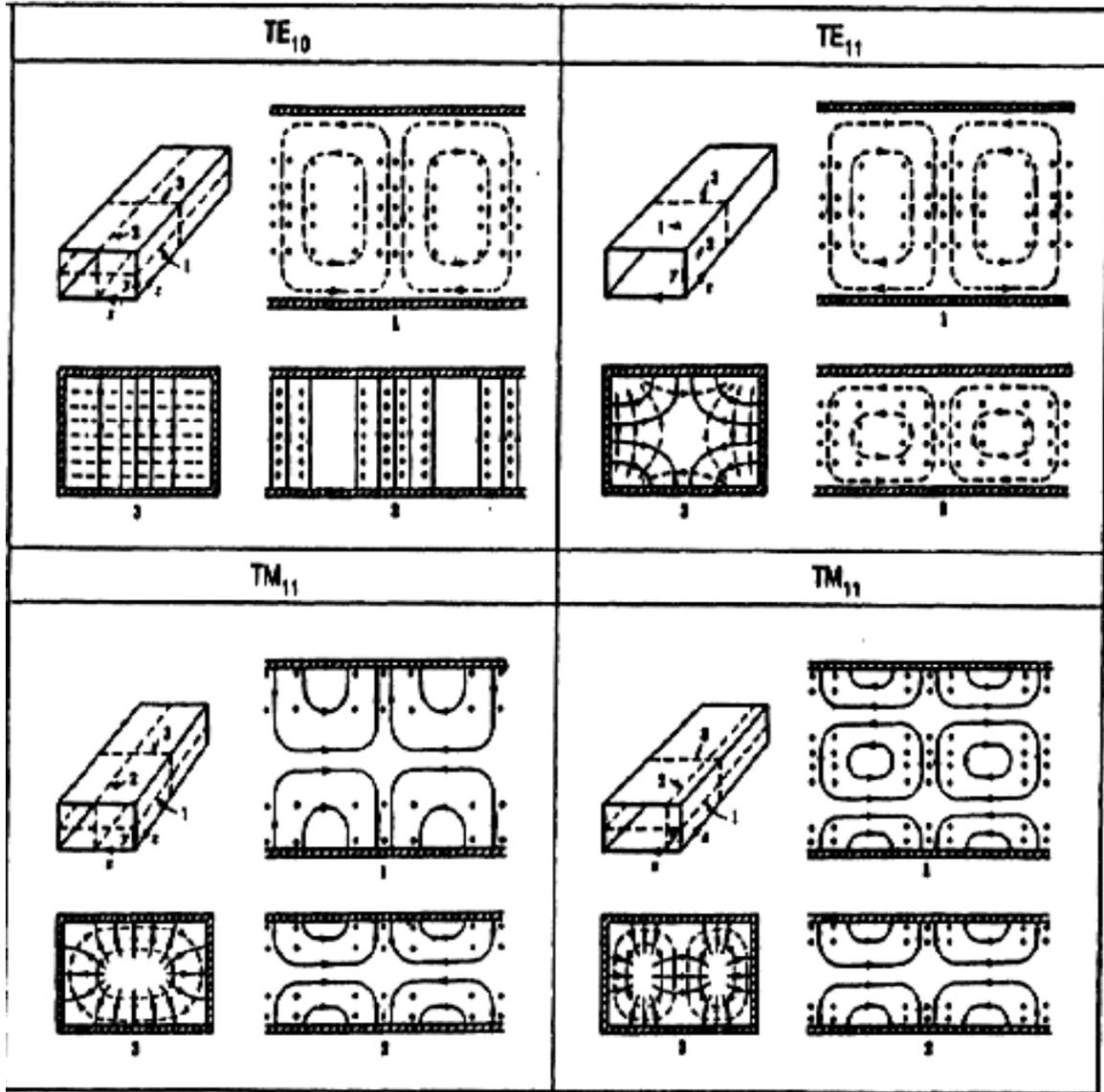
تنتشر الأمواج الكهرومغناطيسية عبر العديد من الأشكال ، فهناك الموجة المشعة، التي تنتشر في الهواء يوجد أيضا الموجة التي تنتشر بين خيطين متوازيين ، سطحين متوازيين أو عبر كابلات محورية ، الخيطين المتوازيين والكابلات المحورية، تستعمل في الأنظمة العاملة باستطاعة منخفضة، فهي تستخدم في مجال الهاتف وهوائيات التلفزيونات. أما عند الترددات و استطاعات الخروج المرتفعة يكون الضياع في الكابلات والخيوط المتوازية مهما وبالتالي غالبا ما تختار موجهات الأمواج، كخط توصيل، كما هو الحال بالنسبة لأنظمة التسخين بموجات الميكرو . وهي على العموم أنابيب ناقلة مجوفة لها مقطع عرضي دائري أو مربع.



الشكل-I-6 : شكل توضيحي لخطوط توصيل الموجات الكهرومغناطيسية [9].

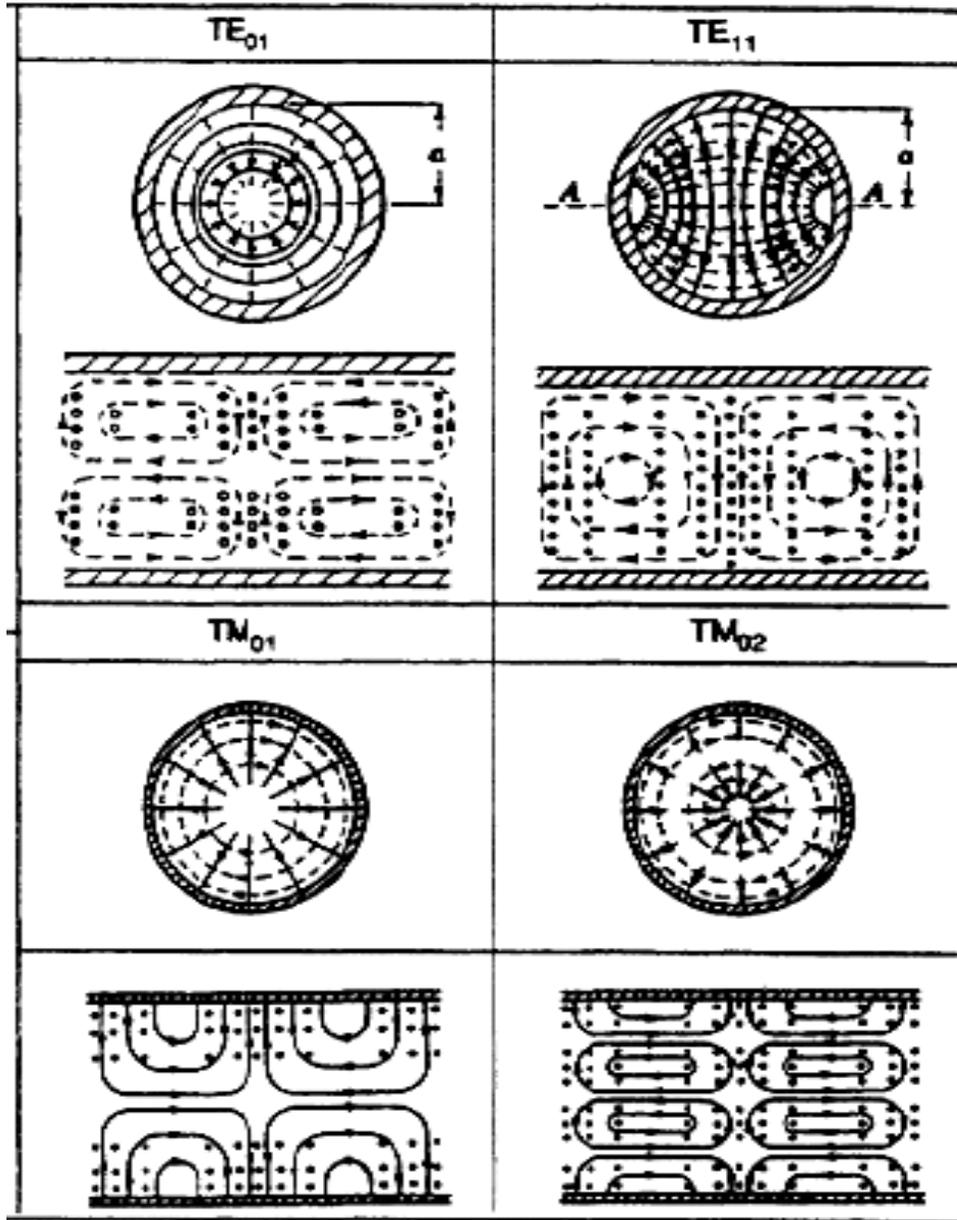
وهناك نمطان ممكنان لانتشار موجات الميكرو، في موجات الأمواج، هما النمط الكهربائي المستعرض (TE) والنمط المغناطيسي المستعرض (TM). كل موجة كهربائية مستعرضة TE و موجة مغناطيسية مستعرضة TM داخل موجة الأمواج، يمكن أن يكون لها تشكيلات حقل مختلفة ، كل تشكيلة للحقل تسمى بالنمط ومعرفة بالأدلة (indexes)  $n$  و  $m$ . في الموجة TE الإسقاط على  $Z$  للحقل الكهربائي غير موجود ، في الموجة TM الإسقاط على  $Z$  للحقل المغناطيسي غير موجود. انتشار الأمواج يكون دائما في الاتجاه  $Z$ . اصطلاح على  $TE_{mn}$  ،  $TM_{mn}$  في موجات الأمواج المربعة و  $TE_{nl}$  ،  $TM_{nl}$  في موجات الأمواج الأسطوانية أين الأدلة  $m$  ،  $n$  و  $l$  هي رتبة الأنماط [9]. رياضيا ، يمكن أن يكونوا أي عدد صحيح ( 2.1.0 ... ) غير أنه ، بسبب الإرتباط بحجم موجة الأمواج ، الحقيقة الفيزيائية تسمح فقط بالقيم المنخفضة لـ  $m$  ،  $n$  و  $l$  ( لكن دون أن تأخذ القيمة 0 في أن واحد) وهذا ما يحد من عدد الأنماط التي يمكن أن تكون موجودة في موجة الأمواج. في موجات الأمواج المربعة ، الموجة TM لها إسقاطات الحقل  $H_x$  ،  $H_y$  ،  $E_x$  ،  $E_y$  ،  $E_z$  ،  $H_z$  ،  $H_x$  ،  $H_y$  ،  $E_x$  ،  $E_y$  ،  $E_z$  . من أجل موجات الأمواج الأسطوانية، الموجة TM لها إسقاطات الحقل  $H_r$  ،  $H_\phi$  ،  $E_r$  ،  $E_\phi$  ،  $E_z$  والموجة TE لها إسقاطات الحقل  $H_r$  ،  $H_\phi$  ،  $E_r$  ،  $E_\phi$  ،  $E_z$  . موجة الأمواج المربع له ارتفاع "b" على الاتجاه  $Y$  وعرض "a" على الاتجاه  $X$  ، وموجة الأمواج الأسطوانية له نصف قطر  $r$ . الأمواج تنتشر دائما في الاتجاه  $Z$ .

الشكلين 7-I و 8-I، يظهران توزيعات الحقل، لبعض الأنماط ذات رتب صغيرة، في الشكلين الحقول الكهربائية تم توضيحها بخطوط مستمرة، في حين أن الحقول المغناطيسية تم توضيحها بخطوط منقطعة. هنا الموجة تنقل كمية متساوية من الطاقة في الحقول الكهربائية والمغناطيسية [9].



الشكل 7-I : توزيعات الحقول لبعض الأنماط في موجة أمواج مربع [9].

توزيعات الحقل في الشكلين 7-I و 8-I، هي معقدة قليلا. عامة على سطح ناقل ، خطوط الحقل الكهربائي، هي ناظمية على السطح وخطوط الحقل المغناطيسي هي متوازية معه . بعيدا على السطح خطوط الحقل تتبع الاستمرارية .



الشكل 8-I : توزيعات الحقول لبعض الأنماط في موجه أمواج أسطواناني [9]

**3.3-I عناصر التقويم والضبط****1.3.3-I ماص الإشعاع المنعكس**

عند معالجة المواد، التي لا تمتص الطاقة الكهرومغناطيسية بشكل جيد، بموجات الميكرو، فإن مقداراً مهماً من الاستطاعة، غالباً ما ينعكس عائداً إلى منبع موجات الميكرو. إن فرطاً في الاستطاعة المنعكسة، يمكن أن يلحق أضراراً بالمغنترونات. يتمثل هدف الدوار ( ماص الإشعاع المنعكس ) في حماية معدات موجات الميكرو، حيث يسمح لموجات الميكرو بالمرور عبر الدوار في اتجاه واحد فقط. في الدوار ثلاثي الفتح، توصل فتحة بمنبع موجات الميكرو وأخرى توصل بالمطبق، وثالثة توصل بالحمل (dummy load). وبالتالي تغير الاستطاعة المنعكسة والعائدة إلى المغنترون اتجاهها عن هذا الأخير ويقوم الحمل، غالباً ما يكون الماء، بامتصاص الاستطاعة المنعكسة.

**4.3-I مطبقات موجات الميكرو وأنظمة المعالجة [10]**

يعتبر تصميم المطبق ذو أهمية كبيرة للتسخين بموجات الميكرو، لأنه هو الذي يحول الطاقة الكهرومغناطيسية من موجة الأمواج إلى المادة المراد معالجتها. شكل المطبق متعلق ب- تردد التشغيل - خواص، حجم وشكل المادة - نوع المعالجة (مكتم أو مستمر). إن حقول تغير درجات الحرارة داخل المادة، الناتجة عن التسخين بموجات الميكرو، مرتبطة بتوزيع الحقول الكهربائية داخل المطبق. يوجد ثلاث أنواع من المطبقات، حسب تشكيلة الحقل الكهرومغناطيسي: مطبقات حقل قريبة، مطبقات أحادية النمط ومطبقات متعددة الأنماط. من أجل معالجة المواد، مطبقات التجاوب أحادية النمط ومتعددة الأنماط، هي الأكثر رواجاً لأن قوى حقولها الكهرومغناطيسية عالية. إن نوع المطبق المستعمل في نظام المعالجة بموجات الميكرو، يتعلق غالباً بطبيعة المواد المراد معالجتها. تعتبر أنظمة المعالجة أحادية النمط ومتعددة الأنماط، ومتعددة الأنماط متغيرة التردد، المتوفرة تجارياً كلها تستعمل في أبحاث المعالجة بموجات الميكرو، وكل واحد من هذه الأنظمة له محاسن وله مساوئ.

**1.4.3-I المطبقات أحادية النمط**

في مطبقات موجات الميكرو، أو حجرات التطبيق، يمكن أن نقوم بإنجاز تحليل نظري بغرض وصف استجابة موجات الميكرو. بمعرفة هندسة المطبق يصير، غالباً، بالإمكان حل معادلات ماكسويل تحليلياً أو عددياً بالشروط الحدية المناسبة. يعتمد تصميم مطبقات أحادية النمط، على حل معادلات ماكسويل لتؤيد نمط تجاوب واحد. حيث يكون حجم المطبقات من رتبة طول موجي واحد تقريباً. وللحفاظ على نمط التجاوب، تتطلب هذه الحجرات منبع موجة ميكرو ذو تردد خروج ثابت أو قليل التغير، ولأنه يمكن تحديد مقدار الحقل الكهرومغناطيسي، باستعمال الطريقة التحليلية والعددية، فإن مناطق الحقل الكهرومغناطيسي عالية

ومنخفضة الشدة تصبح معروفة. يشار إلى أن مطبقات أحادية النمط، لديها توزيع غير متجانس للحقل الكهرومغناطيسي لكن ممكن التنبؤ به. على العموم ، تملك حجرات أحادية النمط بقعة ساخنة واحدة يمكن معالجة المواد من خلالها ، أين تكون فيها قوة الحقل الكهرومغناطيسي عالية. هذه القدرة على تصميم مطبق تعرف فيه مواقع قوى الحقل العالية والمنخفضة يمكن أن تعطي ميزات إيجابية محددة. يمكن ، من خلالها أن نحصل على معالجة مثالية لأحجام صغيرة ومحددة ، حيث يمكن ، عبر تصميم مناسب، لمطبقات أحادية النمط أن تستعمله لتبئير (تركيز) حقل موجة الميكرو عند موقع معطى. استعملت هذه التقنية لتلحيم الخزفيات [11 ، 12]. يراد في هذا التطبيق تركيز طاقة موجة الميكرو على الحد الفصل البيني دون تسخين باقي حجم الخزفية. من الواضح أن الحدود التي يفرضها الحجم، في مطبق أحادي النمط يحد من استعمال هذه التقنية إلى حدود فاصلة بينية صغيرة جدا نسبيا التي ستنتطبق على منطقة قوة الحقل العالية في مطبق أحادي النمط. حديثا طور العديد من الباحثين مطبقات أحادية النمط مع تغلبهم على بعض هذه الصعوبات العملية. حيث استطاع كل من تينقا ورفقاؤه [13] تطوير مطبق أحادي النمط (open – ended) لهدف التلحيم المستمر، للوحات الخزفية مع تغلبه على بعض الحدود العملية.

زيادة على هذا، فإن معرفة توزيع الحقل الكهرومغناطيسي، سيسمح بوضع المواد في المنطقة ذات شدة الحقل الأعلى وذلك لتحقيق تزاوج أفضل لهذا السبب، استعملت هذه الحجرات لدراسة وقياس التدرجات المخبرية، للتفاعلات بين موجات الميكرو والمواد. على سبيل المثال، تستعمل هذه الحجرات أحادية النمط غالبا في السلم المخبري من أجل دراسة أثر موجات الميكرو على العينات الصغيرة، حيث تعطي الحجرات أحادية النمط وسطا جد متحكما فيه حيث توضع العينات الصغيرة من أجل تزاوج أفضل. في حجرات موجات الأمواج الأكثر حجما ، العينات الصغيرة المستعملة لغرض الدراسات الحركية لا تقدم تزاوج حمل مهما. وتكون العملية أكثر صعوبة للتحكم في تزاوج الأحمال الصغيرة. توجد مزية إضافية لحجرات التسخين أحادية النمط وهي مقدرتها على مراقبة الصور تلفزيونيا للخواص العزلية أثناء المعالجة [14].

وإن تكون نماذج التسخين ذات الحجرات أحادية النمط غير منتظمة. فإنه يمكن في بعض مطبقات أحادية النمط تبديل أنماط التجاوب. أحيانا، يكون لأنماط التجاوب المختلفة - الممكنة التحقيق داخل المطبق - نماذج تسخين إضافية (مكملة). يتحقق تبادل النمط في مطبقات أحادية النمط بتغيير هندسة المطبق أو بضبط تردد منبع موجات الميكرو. لدى المطبق أحادي النمط الأسطواني، المطور في جامعة ميتشغان والمسوق من طرف وايفمات أى أن سي، ارتفاع قابل للضبط. فيضبط الارتفاع يمكن أن يؤالف إلى نمط تجاوب مختلف (مغاير). انطلاقا من معرفة نماذج التسخين ذات الحجرات أحادية النمط يمكن تغيير نمط التجاوب أثناء الاستعمال لبلوغ درجات حرارة منتظمة داخل المادة [15].

إن تغيير أبعاد الحجرة يتطلب مدة زمنية معينة وهذا يدعو إلى دراسة منابع موجة الميكرو المتكونة من أنبوب تجوال الموجة متغيرة التردد بغية تبديل النمط [16]. يغير التردد في أنابيب تجوال الموجة ليسمح

للحجرة أن تتلقى نمط تجاوبي مغاير (مختلف). وباستعمال هذه المنابع يتم التغلب على المجهود الإضافي الناتج عن الفترة الزمنية المرتبطة بالتغيير الميكانيكي لأبعاد الحجرة. وإن تكن هذه المطبقات مستعدة لقبول أنماط تجاوب متعددة، فإن نمطا وحدا يمكن أن يختار في الوقت نفسه. تشمل تطبيقات أخرى للمطبقات أحادية النمط استعمالات التسخين ومعالجة الشعيرات (خبيطات) الخزفية [17،18]. مع أن مطبقات أحادية النمط لديها بعض التطبيقات الكامنة ودراسات على المستوى المخبري لتفاعلات موجة ميكرو/ مواد، فإن حجرات أحادية النمط يصعب الزيادة في حجمها لبلوغ متطلبات العديد من التطبيقات الصناعية. ويرجع هذا إلى القيود الهندسة وعدم انتظام الحقول. لهذا السبب تصمم، عموما، حجرات أحادية النمط لأغراض خاصة، أهمها الدراسات المخبرية، المعالجة بالبلازما ومعالجة الألياف. لمعالجة مكونات كبيرة الحجم ومعقدة الشكل يتطلب مطبقات أكثر حجما وذات حقول أكثر انتظاما.

### 2.4.3-I المطبقات متعددة الأنماط

تستطيع العديد من أنماط انتشار موجات الميكرو، أن تتواجد في حجرة متعددة الأنماط، في نفس الوقت. يستعمل هذا النوع من المطبقات، في أفران الطبخ المنزلية العاملة بموجات الميكرو. على خلاف تصميم مطبقات أحادية النمط، التي صممت اعتمادا على حلول معادلات الحقل الكهرومغناطيسي، لمطبق معلوم الهندسة، فإن تصميم مطبقات متعددة الأنماط، معتمدة (مؤسدة) غالبا على الصواب والخطأ التجربة والحدس [19]. بزيادة حجم حجرة موجة الميكرو يزداد كذلك عدد أنماط التجاوب الممكنة. وبالتالي تكون مطبقات متعددة الأنماط، أكبر طولا من طول موجي واحد. من أجل حجرة مستطيلة الشكل، تعطى معادلة عند ترددات التجاوب [20].

$$(3.I) f_{nml} = c \left[ \left( \frac{l}{2d} \right)^2 + \left( \frac{m}{2b} \right)^2 + \left( \frac{n}{2a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

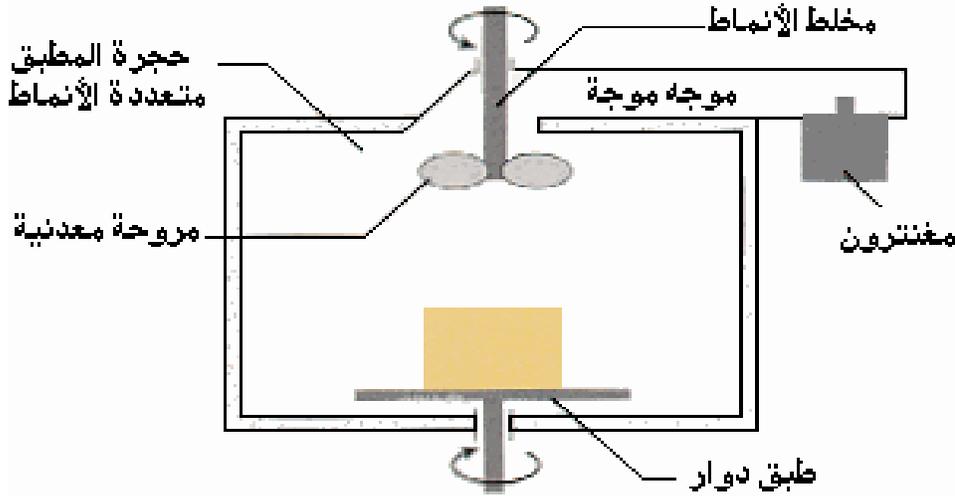
حيث  $f_{nml}$  هو تردد التجاوب للنمط  $TE_{nml}$  أو  $TM_{nml}$ ؛  $c$  سرعة الضوء؛  $n, m, l$  عدد تغيرات أنصاف الجيوب لنموذج الموجة العاملة على امتداد المحاور  $X, Y, Z$ ؛  $a, b, d$  أبعاد الحجرة في الاتجاهات  $X, Y, Z$ . ينتج عن وجود أنماط مختلفة، العديد من البقع الساخنة داخل حجرة موجات الميكرو. لتخفيض أثر البقع الساخنة، استعملت العديد من التقنيات، لتحسين انتظامية وتجانس الحقل. يمكن تحسين انتظامية وتجانس حقل موجة ميكرو بزيادة حجم الحجرة. وبسبب التزايد السريع في عدد الأنماط

داخل مطبق، متعدد الأنماط نتيجة للزيادة في أبعاد الحجرة، نماذج التسخين المتعلقة بأنماط التجاوب المختلفة تبدأ في التراكب. أبعاد الحجرة يجب أن تكون أكبر بكثير من طول موجة الميكرو العاملة، من أجل تجانس أكثر للحقل الكهرومغناطيسي. تنص القاعدة، أنه من أجل بلوغ انتظام وتجانس في الحقل، يجب أن تكون أبعاد المطبق أكبر بـ 100 مرة من الطول الموجي للتردد العامل [21]. لسوء الحظ، عند التردد الشائع 2.45 جيجا هرتز، أطول بعد يجب أن يتجاوز 40 قدما (1200 سنتمتر). بالإمكان بلوغ انتظام و تجانس أكبر في الحقل بالاشتغال عند ترددات أعلى. فعند الترددات الأعلى يكون طول الموجة أقصر، وبالتالي المطبق المطلوب لبلوغ الانتظام، يمكن أن يتقلص حجمه إلى حجم عملي.

إن يكون يبدو أن التردد الأعلى للمعالجة، هو الحل لخلق انتظام أكبر، فإن التردد 2.45 جيجا هرتز قادر على التوغل، أعمق لخلق تسخين حجمي داخل المادة. و لهذا السبب أجريت العديد من المحاولات لبلوغ تسخين أكثر انتظاما داخل أفران متعددة الأنماط وذات حجم أصغر عند التردد 2.45 جيجا هرتز [22].

تجهز أفران موجات الميكرو المنزلية، بأرضية (طبق) دوارة تدور بمجرد تشغيل الجهاز. إن الهدف من الأرضية الدوارة هو تقليص أثر البقع الساخنة وذلك بتمرير الطعام خلال المناطق عالية ومنخفضة الاستطاعة، وبالتالي بلوغ انتظام متوسط مع مرور الوقت. طريقة أخرى لتحسين انتظام الحقل من خلال مخلطات الأنماط. مخلطات الأنماط عبارة عن عاكسات تشبه المراوح، تدور داخل الحجرة بالقرب من مخرج موجة الأمواج. خلط الأنماط يخلط الأنماط، بعكس الموجات على شفرات المروحة ذات الأشكال الغير منتظمة، ويعيد توزيع الحقل الكهرومغناطيسي باستمرار. مخلطات الأنماط، مثلها مثل الأرضية الدوارة، تخلق انتظاما وسطيا مع الزمن. زيادة على هذا، فإن إضافة مخارج متعددة لموجات الميكرو في حجرة متعددة الأنماط يرفع أكثر الانتظامية [23].

ترتبط أغلبية التقنيات المستعملة في خلق الانتظامية بتغيير الحقل الكهرومغناطيسي، داخل حجرة موجة الميكرو. طورت طريقة أخرى من أجل الوصول إلى تسخين أكثر انتظامية متمثلة في التسخين الهجين (المختلط). يتم التسخين الهجين بتركيب التسخين بموجات الميكرو والتسخين عن طريق التحويل التقليدي للحرارة عبر الإشعاع، الحمل، أو النقل. استعملت تغييرات هذه الطريقة بنجاح من قبل باحثين يعملون بالمختبر الوطني لأوك ريدج [24] وجامعة فلوردا [25] للتسخين المتجانس للخزفيات داخل فرن متعدد الأنماط.

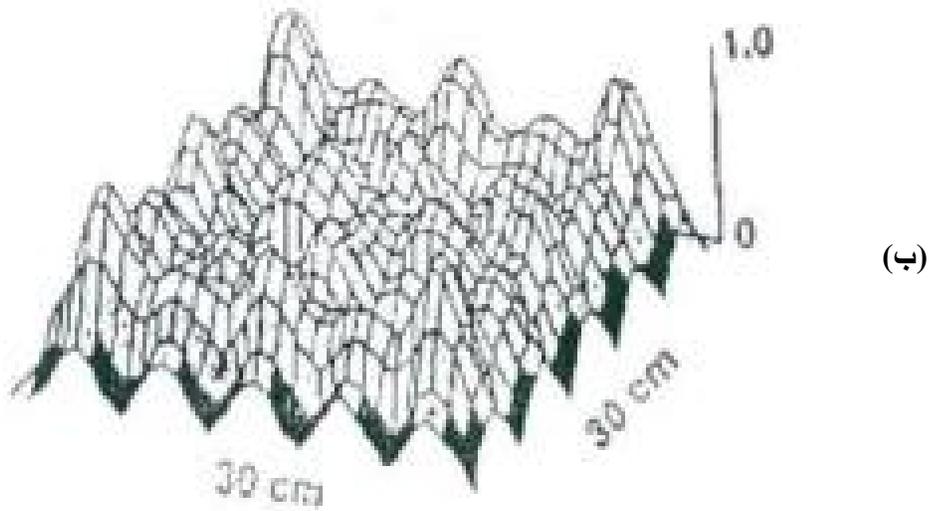
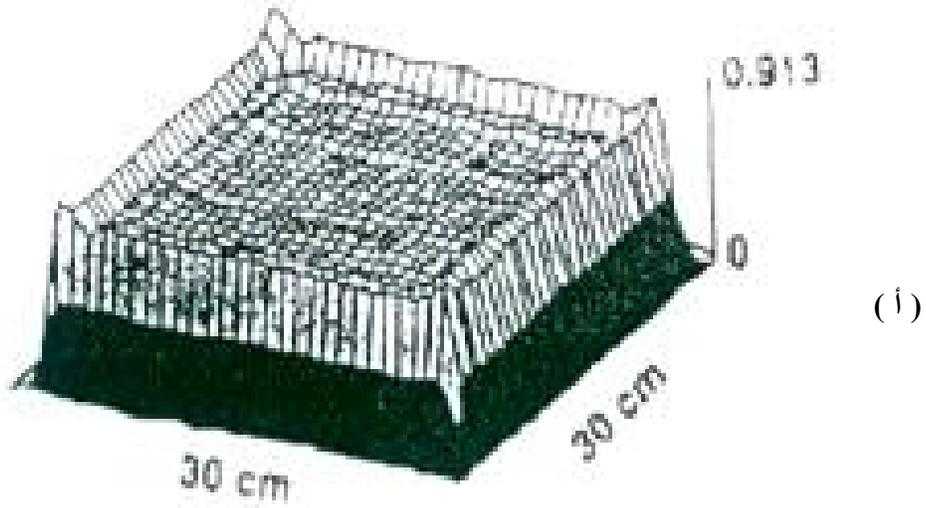


الشكل-9 مطبق متعدد الأنماط يشتمل على مخلط أنماط و طبق دوار

تعتبر المطبقات متعددة الأنماط نموذجية، وأكثر ليونة في الاستعمال، من مطبقات أحادية النمط، لأجل معالجة الأجسام الكبيرة والمعقدة الشكل . هكذا كانت أنظمة متعددة الأنماط ، إلى حد بعيد ، أنظمة المعالجة الأكثر شيوعا (استخداما) في التطبيقات الصناعية. قامت كلا من جامعة ديلاور و فلوردا، بتركيز أبحاثهما المتعلقة بالمعالجة بموجات الميكرو، على استعمال أنظمة متعددة الأنماط لمعالجة مركبات البولمر والخزفيات .نظام المعالجة التي استخدمته جامعة ديلاور، هو عبارة عن نظام موجة ميكرو متعدد الأنماط، ذو استطاعة خروج 6 كيلواط. جهزت الحجرة الكبيرة بعدة مخارج لموجهات الأنماط و خلاط للأنماط بهدف زيادة تجانس وانتظامية حقل موجات الميكرو. إضافة إلى هذا ، يمكن للحجرة أن تخلق (تفرغ) ويعاد شغلها بغاز للتغليف بغية معالجة الخزفيات، في محيط قابل للتحكم. من أجل أبحاث مركبات البولمر تم تعديل نظام الخلاء، ليمح بتطبيق ضغط على رقائق المركب باستعمال كيس خلاء.

طورت حديثا، أنظمة معالجة متعددة الأنماط، متغيرة التردد لأبحاث المواد. تم تطوير فرن موجات الميكرو متغير التردد (VFMF)، من طرف باحثي المختبر الوطني لأولك ريدج ولامدا تكنولوجي ، آي ، ان ، سي، الذي كان قادرا، على تجاوز العقبات، (مشاكل) الناجمة عن عدم انتظامية الاستطاعة داخل حجرات متعددة الأنماط. يستعمل النظام، أنابيب تجوال الموجة ،لمسح تردد حقل موجة الميكرو. الحجرة المستعملة في هذا النوع من النظام هي حجرة متعددة الأنماط. والنتيجة هي انتظامية وسطية للإستطاعة مع الزمن، داخل حجرة موجات الميكرو. إن المقدرة على تحريض (حث) العديد من أنماط التجاوب المختلفة بمسح مجال من

التردد، يسمح بتسخين منتظم داخل حجرة صغيرة. ثبت أنه يمكن لرقائق مركب كبير أن تعالج مرتين متواليتين [26] ، وكذلك أحجام كبيرة من الراتينج (resin) يمكن أن تعالج بانتظام بموجة ميكرو متغيرة التردد [27]. كما هو حاصل في أنظمة المعالجة متعددة الأنماط والمحددة (ثابتة) التردد، فإن الانتظامية ستزداد أكثر في مطبق واسع (كبير) نتيجة لإمكانية ظهور عدد أكبر من أنماط التجاوب الممكنة. طورت نماذج نوعية لتوزيع الاستطاعة، في فرن موجات الميكرو متغيرة التردد لتوضيح المقدرة على خلق انتظامية، داخل حجرة صغيرة بمسح الترددات خلال نطاق تمرير (bandwith) [6،28]. يستعمل النموذج المعادلة (3) لحساب ترددات نمط التجاوب في نطاق التمرير. حسبت استطاعة كل تردد تجاوب ثم جمعت مع بعضها، للحصول على كثافة استطاعة موحدة (شكل I-10). كما هو متوقع من زيادة أنماط التجاوب الممكنة ، فإن انتظامية طاقة موجات الميكرو، قد حسنت عندما يسمح التردد. على الرغم من هذه الميزات الإيجابية في استعمال فرن موجة ميكرو متغير التردد، إلا أن منابع أنابيب تجوال الموجة المستعملة في هذه الأفران، باهظة التكلفة بالنسبة لمقدار الاستطاعة المولدة. ولهذا يسود الاعتقاد عند أغلبية الباحثين، أن المعالجة بالتردد المثبت (المحدد) لديها تطبيقات أكبر في الصناعة، نتيجة لمتانة التقانة في هذا المجال، إضافة إلى التكلفة المنخفضة للمعدات، مما يعطي تكلفة منخفضة للمنتج.



الشكل I-10 توزيع الإستطاعة في ( أ ) مطبق موجات ميكرو متغير التردد ذو عرض عصابة 2 جيجا هيرتز ( ب ) مطبق موجات ميكرو يشتغل عند التردد 2 جيجا هيرتز [ 6 ]

## الفصل الثاني دراسة التسخين بموجات الميكرو

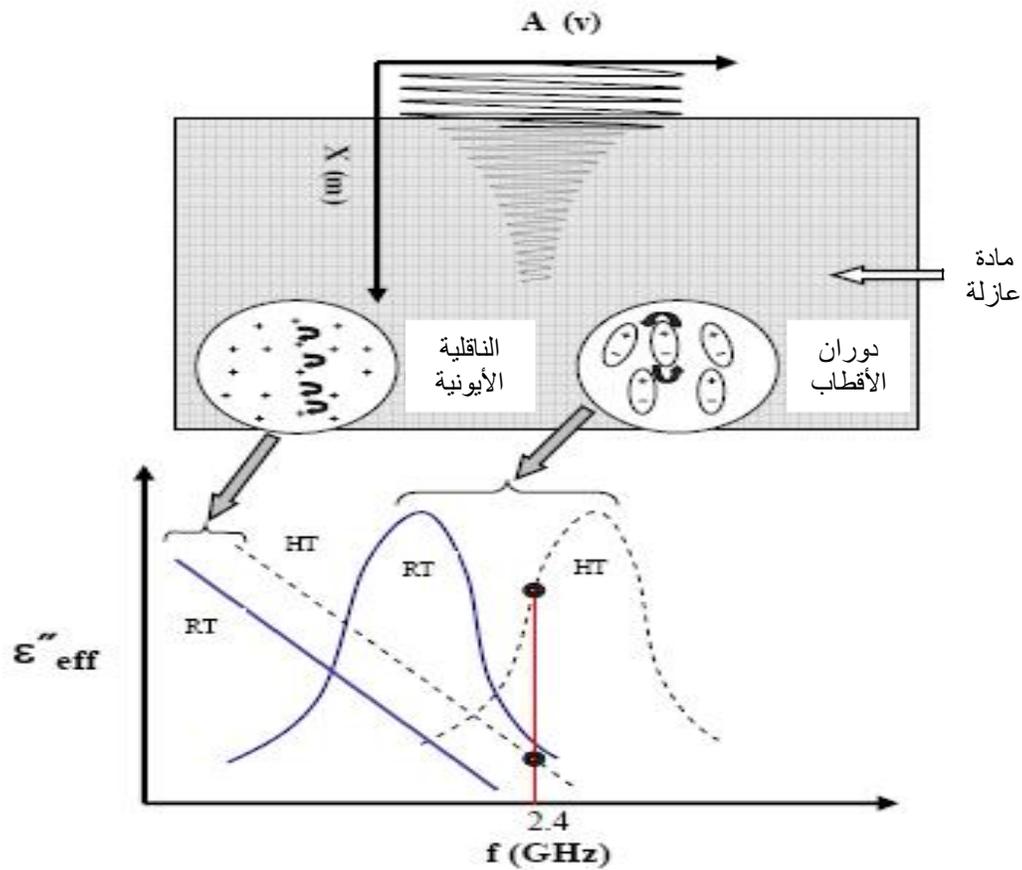
يشتمل هذا الفصل، على شرح آلية التسخين بموجات الميكرو، والمبادئ التي تحكم تفاعلات موجات الميكرو مع المواد، مع ذكر بعض الأبعاد التي تؤثر في التسخين بطريقة أو بأخرى. كما نتطرق في آخر الفصل، إلى بعض تطبيقات التسخين باستعمال موجات الميكرو، لبعض الباحثين، وعلى الخصوص معالجة المواد الخزفية. حيث نستعرض الطرق التجريبية المتبعة، ومنظومات التسخين المستعملة، مع ذكر أهم النتائج التي توصلوا إليها ، وكذلك تفسيراتهم للتسخين بموجات الميكرو.

### II-1 آلية التسخين بموجات الميكرو

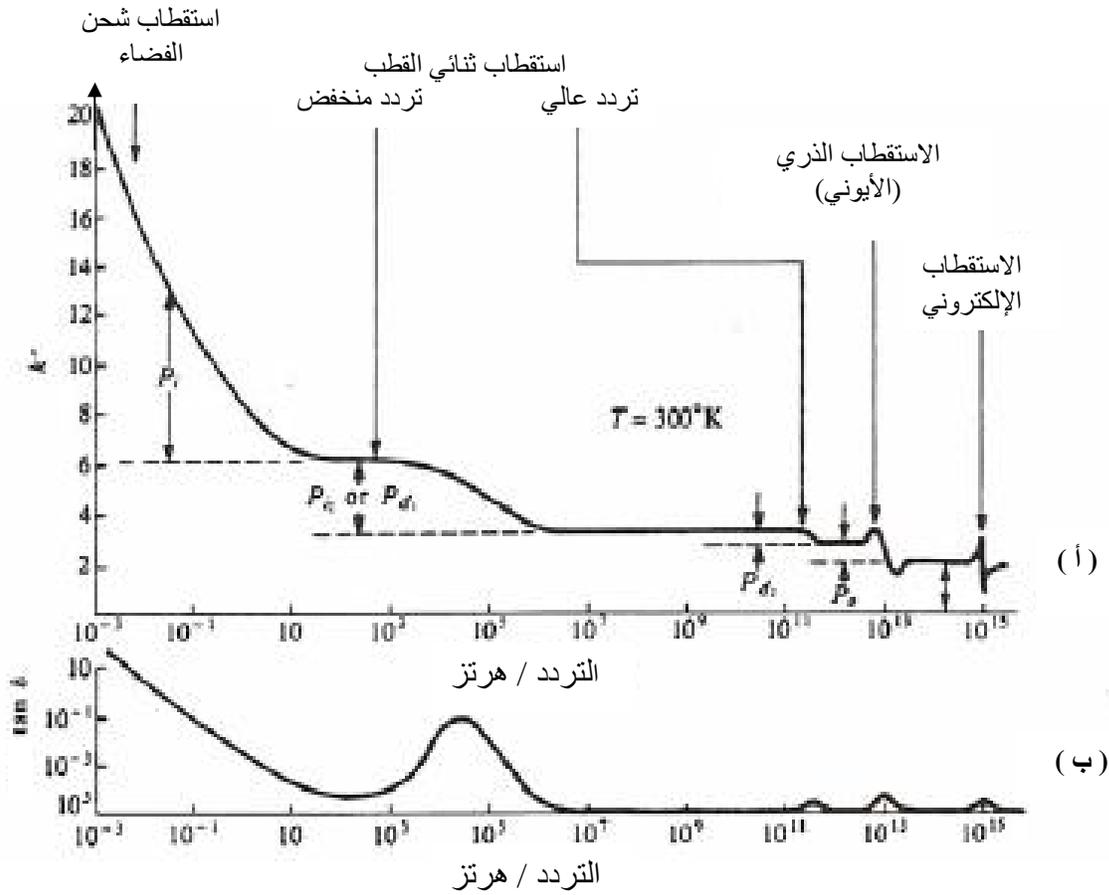
#### II-1.1 الاستقطاب

التفاعل بين موجات الميكرو و المواد العازلة (diélectric)، يسبب استقطاب للمادة ، يوجد العديد من الآليات التي تساهم في الاستجابة العزلية للمواد، تشتمل هذه الآليات على آليات الاستقطاب الإلكتروني ، الاستقطاب الذري و الناقلية الأيونية ، استقطاب ثنائيات الأقطاب (توجه ثنائيات الأقطاب) و آلية استقطاب ماكسويل وانبير (استقطاب شحن الفضاء) [29]. في الحالة العامة ، تطبيق حقل لكل واحدة من هذه الآليات، يؤدي إلى تحريك للشحنة و هذا يؤدي إلى استقطاب في اتجاه الحقل، حيث أنه في المواد العازلة ، تتحرك الشحنة المحلية كاستجابة للحقل الكهربائي المطبق . يوجد داخل المادة شحن مقيدة و أخرى حرة . ينتج عن حركة الشحنة استقطابا، ينتج عليه توزيع جديد للشحن، الذي يؤدي إلى تغير قيمة الحقل الكهربائي داخل العازل . إن استقطاب الشحنة الكهربائية، عندما تقيد الحركة الإنسحابية أو عندما تقيد الحركة الدورانية للجزيئات المستقطبة ، ينتج عنه تأخر بين الحقل الكهربائي و الاستقطاب. هذا التأخر الزمني، معروف بزمّن الاسترخاء، ينتج عنه تبدد للطاقة، على شكل حرارة داخل المادة. التسخين بموجات الميكرو هو كنتيجة لهذا الاسترخاء العزلي. موجات الميكرو يمكن امتصاصها من طرف المواد العازلة بالاستقطاب أو الناقلية ، الاستقطاب يؤدي للتنقل القصير للشحنات، عبر تشكيل دوران للأقطاب الثنائية (أو الأقطاب المغناطيسية إن وجدت) ، الناقلية تستلزم تنقلات طويلة (بالمقارنة مع الدوران ) للشحنات . العمليتين تعطيان ضياع في الامتصاص، في بعض مجالات التردد كما هو في الشكل II-1، في هذا الشكل فقدان في الامتصاص (والمسمى أيضا فقدان في العازلية ) "e بسبب الناقلية الأيونية، السائدة في الترددات المنخفضة، ودوران لثنائيات القطب الدائمة، في الترددات العالية ، الضياع في الناقلية الأيونية، راجع للضياع الأومي،(في المقاومة) الذي يحصل لما الأيونات تنتقل عبر المادة، و تتصادم مع أنواع أخرى ، الناقلية الأيونية تنخفض مع ارتفاع التردد، لأن الوقت المسموح للتنقل في جهة الحقل ينقص مع زيادة التردد. زيادة الحرارة يزيد من

الطاقة الكامنة لثنائي القطب، مما يسمح لهم الاستجابة لحقل الاهتزاز ، مغيرا الامتصاص إلى ترددات أعلى. الشكل I-II يوضح آليتين للامتصاص التي يمكن أن تساهما في الفقدان العزلي  $e''_{eff}$  ، الناقلية الأيونية ، التي يمكن أن تكون مهمة في الترددات المنخفضة ودوران ثنائيات القطب ، التي يمكن أن تكون مهمة تحت ترددات عالية ، هناك تحرك أو تنقل لمنحنيات الامتصاص إلى ترددات أعلى لكلاهما عندما ترتفع درجة الحرارة، يمكن ملاحظة أنه يمكن لمادة ما أن تكون ضعيفة أو سيئة الامتصاص تحت درجة حرارة الغرفة بتردد 2,45 GHz ، عالية الامتصاص في درجات الحرارة الأعلى وتحت نفس التردد ( 2.45 جيجا هيرتز ) [ 30 ]. بالإضافة إلى دوران ثنائي القطب و آلية الناقلية الأيونية، يمكن لآليات أخرى للاستقطاب، كشحن الفضاء ، الشاردي و الاستقطاب الإلكتروني أن تساهم في الضياع ( الفقدان ) ، ولا يمكن دائما التعرف بسهولة تجريبيا بين مساهمة كل آلية في الفقدان الفعلي  $e''_{eff}$  ، ولذلك لمعرفة جيدة باستجابة المواد العازلة للطيف الكهربائي، القياسات يجب أن تكون فوق مجال ترددات معينة (مجالات التردد أين كل واحدة منها يمكن أن تساهم في الفقدان).



الشكل I-II تغير مساهمة آليتين للامتصاص في معامل الفقدان مع تغير درجة الحرارة، (RT) درجة حرارة منخفضة ، (HT) درجة حرارة عالية



الشكل II-2 ارتباط آليات الاستقطاب في العوازل بالتردد (أ) المساهمة في ثابت العزل (ب) المساهمة في زاوية الفقدان

### II-2.1 الاسترخاء العزلي

يمكن أن يلخص الاسترخاء العزلي، بظاهرة عامة تتمثل في وجود وقت من أجل استجابة نظام خاضع لحث خارجي ، يحدث استرخاء للعازل، لما يحدث فجأة الحقل الكهربائي الذي خلق حالة استقطاب داخل المادة . وقت يدعى بزمن الاسترخاء، يستغرق حتى تعود المادة إلى حالتها من الفوضى الجزيئية، هو معرف على أنه الزمن اللازم، لكي ينخفض الاستقطاب إلى  $1/e$  من قيمته الابتدائية .

$$t = \frac{4p\eta r^3}{kT} \quad (1.II)$$

حيث  $\eta$  هي اللزوجة ،  $k$  ثابت بولتزمان ،  $r$  قطر الجزيئة

وكما سبق الإشارة إليه ، جزيئة ثنائية القطب موضوعة داخل حقل متناوب تقوم بحركة دورانية ، في الحقيقة هذه الظاهرة ترافق بظاهرة الاسترخاء ، فالأمر يتعلق بتأخر في الطور، بين تغيرات الحقل ودوران تنائي القطب ، الحقل المطبق له العلاقة التالية

$$E = E_0 e^{i\omega t} \quad (2.II)$$

أين  $E_0$  هو سعة الكمون، و  $\omega$  التردد الزاوي (راديان/ الثانية) ، الاستقطاب الناتج عن هذا الحقل، والمتأخر بـ  $\delta$  بالنسبة إليه هو

$$P = P_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (3.II)$$

تصادف غالبا ظواهر الاسترخاء، في جمل عديدة من الأنظمة الكيميائية، الميكانيكية، أو الكهربائية. تعرف أزمنة الاسترخاء عموما، بمعادلات من الشكل الموالي :

$$t \frac{\partial k}{\partial t} + k = h \quad (4.II)$$

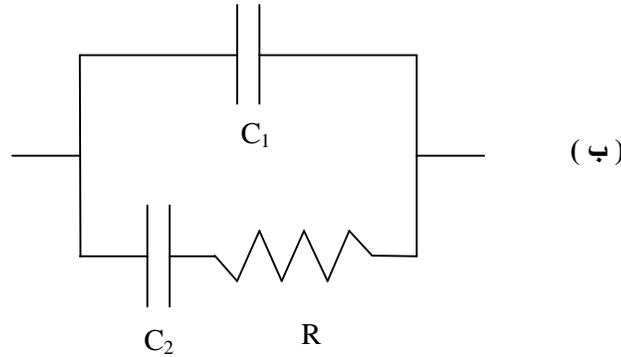
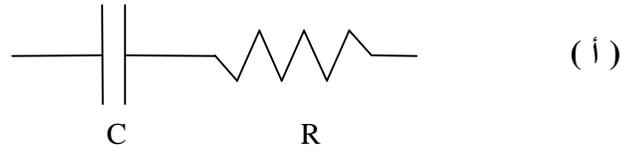
حيث  $h$  و  $k$  هما المتغيران

إن ظاهرة الاسترخاء في المواد العازلة، مماثلة للاسترخاء في الدارات الكهربائية . إن النماذج التي تصف الاسترخاء في المواد العازلة، غالبا ما تتركز على الدارات الكهربائية، المكونة من مقاومات ومكثفات (سعات) على التسلسل أو على التوازي.

إن أبسط دارة تظهر زمن الاسترخاء، هي مقاومة ومكثفة على التسلسل ( شكل II-3 (أ) ). بجمع التوتر،  $V$  ، عبر كلا من المقاومة والمكثفة ، يمكن الحصول على المعادلة التفاضلية للشحنة ،  $Q$  ، في الدارة

$$R \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{C} = V \quad (5.II)$$

حيث  $R$  و  $C$  تمثلان المقاومة والسعة على الترتيب ،  $t$  الزمن.



الشكل II-3 دارتان كهربائيتان مستعملتان لنمذجة المواد العازلة

يمكن إعادة كتابة المعادلة (5-II) على شكل المعادلة (4-II)

$$t \frac{\partial Q}{\partial t} + Q = CV \quad (6.II)$$

حيث زمن الاسترخاء  $\tau$

$$t = RC \quad (7.II)$$

إن حل المعادلة التفاضلية، أين يكون التوتر جيبيًا ومفترض مركباً  $V_0 = e^{i\omega t}$ ، في الإحداثيات القطبية هو [31]:

$$Q^*(\omega, t) = \frac{V_0}{\omega Z(\omega)} e^{i(\omega t - d)} \quad (8.II)$$

حيث  $\delta$  هي الزاوية بين شعاع الشحنة،  $Q^*$ ، وشعاع التوتر،  $V^*$ ، في تمثيل فازو في المستوي المركب (الشكل II-4 (أ)). يتناسب التأخر بين الشحنة والتوتر مباشرة بـ  $\delta$  عندما تكون الاستطاعة المبددة صغيرة كذلك في المعادلة (8.II) تمثل  $\omega$  التردد الزاوي و  $Z$  الممانعة.

استعملت دائرة مهمة، كنموذج للمواد العازلة، مكونة من مقاومة وسعة على التسلسل، بالتوازي مع مكثفة (سعة) (شكل 3-II-ب). يمكن أن تحدد ممانعة هذه الدائرة من تحليل الدارات الأولية :

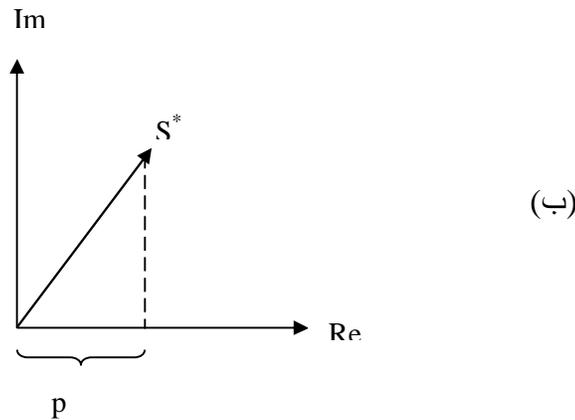
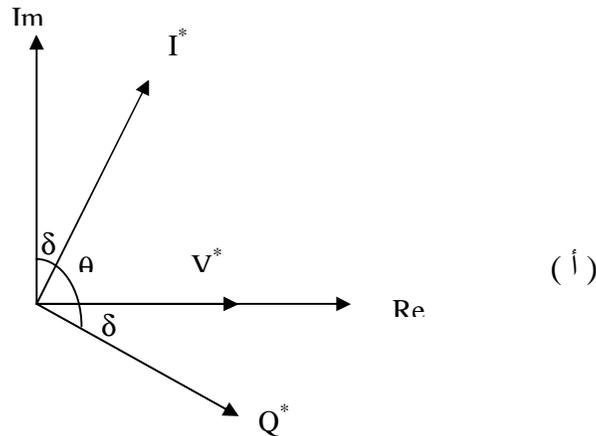
$$Z = \left( \frac{i\omega C_1}{R + i\omega C_1} + i\omega C_2 \right)^{-1} \quad (9.II)$$

حيث  $C_1$  و  $C_2$  هما السعتان المعرفتان في الشكل 3-II-ب). العلاقة بين الشحنة والتوتر معرفة كما يلي [31]:

$$Q^*(\omega, t) = C^*(\omega) V^*(\omega, t) \quad (10.II)$$

حيث  $C^*$  هي السعة المركبة. وبالتالي العلاقة بين الممانعة والسعة يمكن أن تعرف من التيار المتغير الجيبي بـ

$$Z(\omega) = \frac{1}{1 + i\omega C^*(\omega)} \quad (11.II)$$

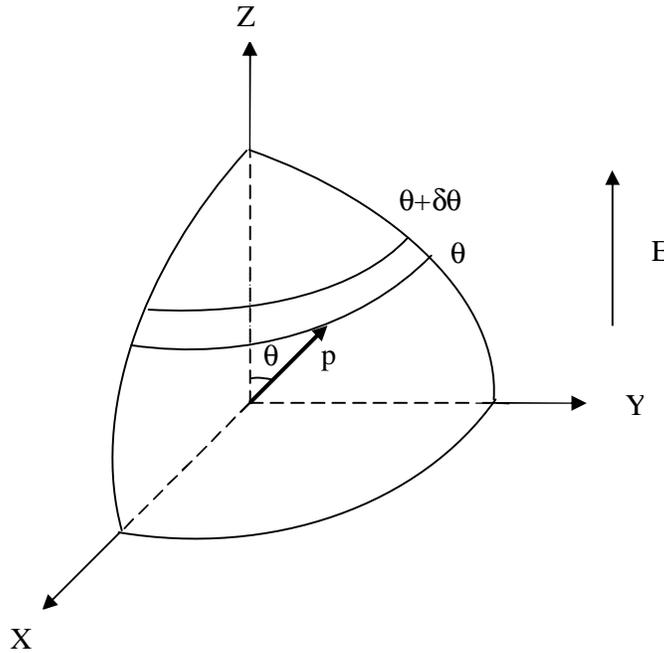


الشكل 4-II-4 مخطط فازولـ ( أ ) التيار، التوتر والشحنة ( ب ) الاستطاعة في دائرة كهربائية [31]

من المعادلتين (9.II) و (11.II) يمكن أن تعرف السعة المركبة

$$C^* = C_1 + \frac{C_2}{1 + w^2 C_2^2 R^2} - \frac{iwRC_2^2}{1 + w^2 C_2^2 R^2} \quad (12.II)$$

شكل السعة المركبة هذه، مماثل لشكل حل ديبياي الكلاسيكي، لسائل عازل مثالي. يوجد عدة طرق لاشتقاق معادلات ديبياي، مؤسسة على التفاعل المجهرى الدقيق، لثنائيات الأقطاب، مع الحقول الكهرومغناطيسية المطبقة [32،31].



الشكل 5-II نموذج لثنائي القطب مستعمل في تمثيل ديبياي لسائل مثالي [32]

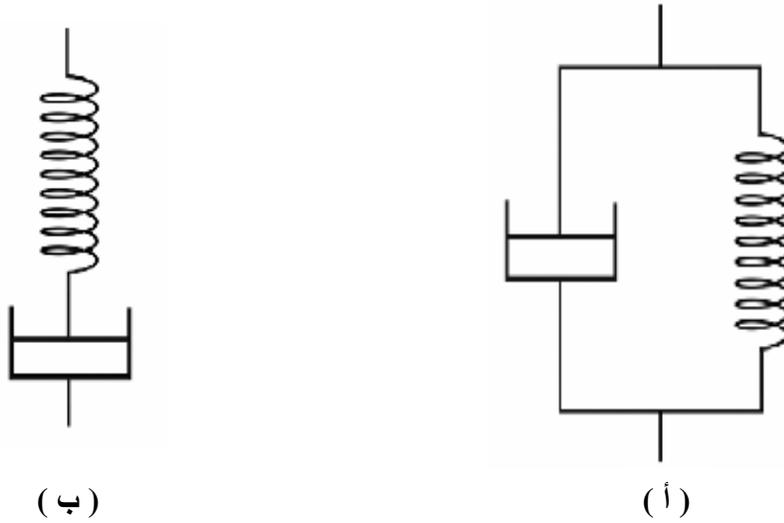
إن وصف ديبياي الكلاسيكي، لسائل عازل مثالي، مفيد للإستخدامه في فهم الفيزياء، التي تقف وراء تفاعل موجات الميكرو مع المواد، على المستوى الجزيئي. في وصف ديبياي ، يفترض أن يكون لجزيئة وحيدة ثنائي قطب كهربائي صغير، عند مركز حجم كروي. ففي غياب الحقل الكهرومغناطيسي، تكون ثنائيات الأقطاب موجهة عشوائيا، في كل الاتجاهات داخل المادة . عندما يطبق الحقل الكهرومغناطيسي، تسعى ثنائيات الأقطاب، إلى التوجه بجهة الحقل الكهربائي (الشكل 5-II). توازن القوة في ثنائي القطب يعطي المعادلة الموالية:

$$I \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + h \frac{\partial q}{\partial t} - pE \sin q = 0 \quad (13.II)$$

حيث يمثل  $E$ ، شدة الحقل الكهربائي ،  $\theta$  ، الزاوية بين ثنائي القطب وحقل موجة الميكرو ،  $I$  ، عزم العطالة لثنائي القطب ،  $\eta$  ، اللزوجة داخل المادة ،  $p$  ، عزم ثنائي القطب. من معادلة الحركة السابقة ، تحاليل إحصائية لتوجهات ثنائيات الأقطاب، يمكن أخذها بعين الاعتبار، ويمكن الحصول على ثابت العزل المركب من المعادلة الموالية [32].

$$e^* = e_{\infty} + \frac{e_0 - e_{\infty}}{1 + (wt)^2} - \frac{i(e_0 - e_{\infty})wt}{1 + (wt)^2} \quad (14.II)$$

حيث  $e_0$  ثابت العزل عند انعدام التردد و  $e_{\infty}$  ثابت العزل عندما التردد لا نهائي. هذا مماثل لشكل المعادلة (12.II) حيث استبدلت الساعات بثوابت العزل. إن حل ديباي من أجل سائل مثالي، تم تبسيطه قليلا وهو في غالب الأحيان غير صالح للتطبيق على العديد من المواد. ينتج نموذج ديباي، عن زمن استرخاء واحد فقط ، والمواد غالبا ما تظهر أكثر من زمن استرخاء واحد. كنتيجة لهذا، طورت نماذج أكثر تعقيدا، لوصف السلوك العزلي لأنواع مختلفة من المواد [33]. يشابه نموذج ديباي للخواص العزلية، كلا من نموذجي فويت وماكسويل، المكون من نوابض ومكابس (مخمدات) المستعملة في المرونة-اللزوجة (شكل II-6) (Viscoelasticity) . وإن تكن هذه النماذج في الغالب غير قابلة للتطبيق على العديد من المواد ، فإنها تعتبر الأساس الذي شكلت عليه نماذج أكثر تعقيدا. إن ظاهرة الاسترخاء في المواد العازلة، تشابه ظاهرة المرونة-اللزوجة، لأن المعادلات المتحكمة في الظاهرتين هما على نفس الشكل [34]. و إن يكن نموذج ديباي مبسطا ، فإنه يبين أن زمن الاسترخاء يتأثر ببنية المادة. ترتبط مقدرة المواد، على أن تسخن بموجات الميكرو، بمقدرة توجه ثنائيات الأقطاب باتجاه الحقل الكهرومغناطيسي، وهذه المقدرة على التوجه تحدد الخواص العزلية.



الشكل 6-II نموذجي (أ) فويغيت و (ب) ماكسويل للمرونة – لزوجة [34]

### 3.1-II الخواص العزلية للمواد

الخواص العزلية للمواد تتحكم في قابلية المواد للتسخين عند إخضاعها لحقل موجات ميكرو وتحدد الخواص العزلية أثر الحقل الكهرومغناطيسي على المادة على المستوى الجزيئي. من أجل أن تولد الحرارة داخل المادة يجب على موجات الميكرو أن تكون قادرة على دخول المادة وإيصال الطاقة إليها. إن ثابت العزل  $e'$  ومعامل فقدان العزلية  $e''$  يحددان المركبة السعوية والنقلية للإستجابة العزلية ، غالبا ما يعبر عن هذين المركبتين بعبارة ثابت العزل المركب  $e^*$  والذي هو قياس لمدى إمكانية العازل لامتصاص وتخزين طاقة كامنة كهربائية.

$$e^* = e' - ie'' \quad (15.II)$$

عبارة أخرى هامة للتعبير عن الإستجابة العزلية هي ظل الفقدان

$$\tan d = \frac{e''}{e'} \quad (16.II)$$

حيث أن ثابت العزل  $e'$ ، يعبر عن قدرة المادة للإستقطاب بحقل كهربائي خارجي، و معامل الفقدان  $e''$  يشير إلى مدى إمكانية المواد، لتخزين الطاقة. أما ميل الفقدان (ظل الفقدان)، فيشير إلى مدى إمكانية

المادة، إلى تحويل طاقة موجات الميكرو الممتصة إلى حرارة . مع امتصاص مرتبط أساسا، بشدة الحقل الكهربائي، التردد، ميل الفقدان (ظل الفقدان)، وثابت العزل.

#### II-4.1 شدة الحقل الكهربائي الداخلي

بالإضافة إلى خواص العازل ، الحقل الكهربائي الداخلي أيضا، يجب أن يكون معروف، من أجل معرفة القدرة التي سوف تمتص، وكذلك فعالية التسخين للمواد . ليس من السهل تحديد الحقل الكهربائي الداخلي، وهذا لأنه يمكن أن يتغير من نقطة لأخرى داخل المادة . الحقل الكهربائي الداخلي، هو أقل من الحقل الكهربائي الخارجي، ويتحكم في ذلك ثابت العزل  $e'$  [35].

$$E_{int} = \left[ 1 - \frac{N(e'-1)}{1+N(e'-1)} \right] E_{ext} \quad (V/m) \quad (17.II)$$

حيث  $N$  هو معامل الاستقطاب، والمتعلق أساسا بشكل وبهندسة المادة، مثلا من أجل عينة من الألومينا موضوعة بين لبوسين (إلكترودين) متوازيين،  $N = 1$  و  $e' = 9$  يصبح الحقل الداخلي  $E_{int} = E_{ext} / 9$ . أي أن القيمة العالية لثابت العزل  $e'$  ، يمكن أن تخفض (تنقص) من الحقل الكهربائي. بالنسبة لنقطة ما داخل المادة، يمكن إيجاد قيمة الحقل الكهربائي الداخلي، بقياس تغير درجة الحرارة مع الزمن  $\Delta T/\Delta t$  وبمعرفة  $C_p$  و  $e''_{eff}$  بالعلاقة التالية [36].

$$E_{int} = \left[ \frac{rC_p \frac{\Delta T}{\Delta t}}{we''_{eff}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18.II)$$

حيث  $\rho$  كثافة المادة و  $\omega$  تردد موجات الميكرو يجب التأكيد على أن الحقل الكهربائي الخارجي، ليس منسجم في العديد من أفران موجات الميكرو متعددة الأنماط، كما هو الحال بالنسبة للحقل الكهربائي الداخلي. ولهذا نجد أن الكثير من أفران موجات الميكرو المنزلية، تحوي على أطباق دوارة ومزاجات (مخلطات) الأنماط. انسجام الحقل يمكن أن يتحسن بزيادة حجم حجرة الفرن ، أبعاد الحجرة يجب أن تكون أكبر بكثير، من طول موجة الميكرو العاملة.

## 5.1-II تحول الطاقة

ترتبط مقدرة المواد الخزفية، على أن تسخن بموجات الميكرو، بسرعة وكمية امتصاص هذه المواد لطاقة موجات الميكرو، وتحولها إلى حرارة، نسبة طاقة موجات الميكرو الممتصة، والمحولة إلى حرارة، تكون وفق المعادلة التالية:

$$P = 2pfe_0 e''E^2 + 2pfm_0 m''H^2 \quad (19.II)$$

أين الطرف على يمين المعادلة، يشير إلى الضياع (الفقدان) الكهربائي والمغناطيسي. على العموم، الضياع المغناطيسي مهم، والضياع الكهربائي، هو فقط الذي يساهم بالطاقة الممتصة. وتصبح المعادلة من الشكل:

$$P = 2pfe_0 e''E^2 \quad (20.II)$$

حيث P : الطاقة الممتصة، والمحولة إلى حرارة في وحدة الحجم ( واط / م<sup>3</sup> )

$$f \text{ تردد موجات الميكرو} = 2.45 \text{ GHz}$$

$$e_0 \text{ سماحية الفراغ} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ (فراذ / متر)}.$$

$e''$  معامل فقدان العزلية، للمادة الخزفية، وهو تابع في درجة الحرارة، ويعبر عنه كذلك بـ

$$e'' = e' \tan d \quad \text{حيث } e' \text{ ثابت العزل النسبي، الذي يمكن أن يكون قياسا لإستقطابية، أي مادة بحقل}$$

كهربائي خارجي، وحدته ( فراذ / متر) و  $\tan d$  هو ظل الفقدان، وهو قياس لمقدار امتصاص المادة لموجات الميكرو، وتحولها إلى حرارة داخل المادة.

$$E \text{ شدة الحقل الكهربائي الداخلي، لموجات الميكرو ( فولط / متر).}$$

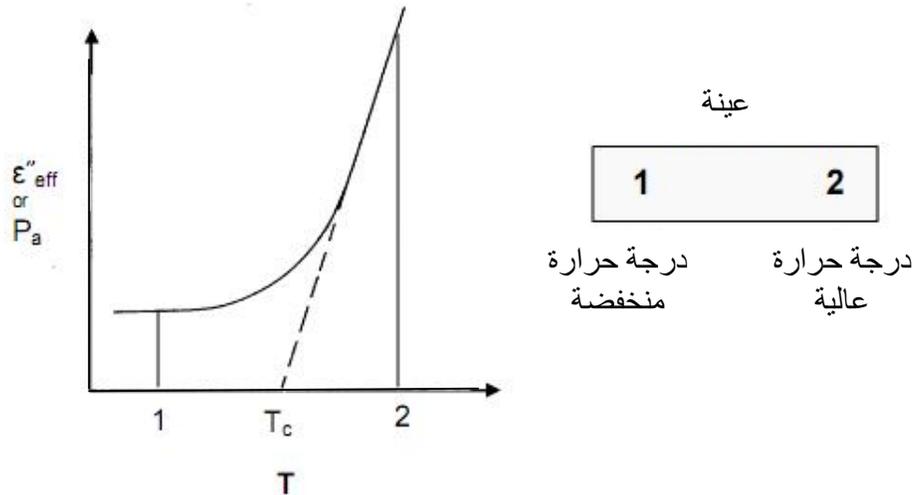
يمكن للعديد من الآليات، أن تكون المسؤولة عن الفقدان الفعلي، داخل المادة ولهذا فإن معامل الفقدان، يعطى بالعلاقة التالية:

$$e'' = e_c'' + e_s'' + e_d'' + e_i'' + e_e'' \quad (21.II)$$

أين  $e_c''$  هو الفقدان الناتج، عن ناقلية التيار المستمر، وهو مهم في ترددات موجات الميكرو للعديد من الخزفيات، كما هو موضح في الشكل 2-II. القيم الأربعة الأخيرة، تمثل الفقدان في العزلية، الراجع لآلية الاستقطاب، أين  $e_s''$  هو ناتج عن شحنة الفضاء،  $e_d''$  ناتج عن ثنائي القطب،  $e_i''$ : الأيوني و  $e_e''$ : الإلكترون. بالنسبة للمواد الخزفية و في مجال ترددات موجات الميكرو،  $e_s''$  و  $e_d''$  هما الأكثر أهمية. كما أن هذه القيم مرتبطة، بالتردد ودرجة الحرارة، يجب قياسها من أجل معرفة كيف يسخن الخزف

في تردد معين، ( مثل : 2.45 GHz ودرجة حرارة الغرفة ). القاعدة الأساسية، هي أن الخزفيات مع معامل فقدان في حدود  $5 < e'' < 10^{-2}$  هي مواد ذات قابلية عالية للتسخين بموجات الميكرو ، الخزفيات بـ  $10^{-2} < e''$  هي مواد صعبة التسخين بموجات الميكرو، أما الخزفيات التي لديها  $e'' > 5$  هي مواد سوف تسخن في السطح، وليس في الحجم [ 36].

العديد من الخزفيات، تظهر زيادة مفاجئة في  $e''$ ، مع ارتفاع درجة الحرارة كما هو موضح في الشكل II-7. كما أن P، هو على ارتباط مباشر بقيمة  $e''$ ، فإنه هنالك ارتفاع بالمثل في القدرة الممتصة، ونسبة التسخين لما درجة الحرارة ترتفع، السبب في هذا التغير السريع، هو على الأرجح راجع إلى دوران سهل لثنائيات القطب، مما يسمح للمادة بأن تسخن من أجل ترددات موجات الميكرو العاملة. درجة الحرارة التي يتم فيها التغير المفاجئ، في معامل الفقدان تسمى بدرجة الحرارة الحرجة،  $T_c$ ، تحت درجة الحرارة الحرجة الخزف يسخن ببطء. القليل من قيم  $T_c$  تم التعرف عليها للمواد الخزفية. مجموعة قيم لدرجة الحرارة الحرجة للمواد لها أهمية كبيرة، حيث لا توجد معادلة تعطي قيمة  $T_c$  بدلالة قيم المواد الأساسية، لذا يجب أن تقاس درجة الحرارة الحرجة للمواد، في جميع الحالات والظروف ( النقاوة، الأطوار، التكوين، الشكل، ...). كمثال فإن النقاوة بـ 99% من الألومينا، يختلف عن 97% من الألومينا و  $a-SiC$  يختلف عن  $b-SiC$ .



الشكل II-7 تأثير درجة الحرارة على  $e''_{eff}$  و P

لكون أن الطاقة تمتص داخل المادة ، فإن القدرة الممتصة في وحدة الحجم، تنخفض كدالة في البعد بين سطح المادة وعمقها ، حيث يعرف عمق الاختراق على أنه المسافة من السطح إلى عمق المادة، أين P ينخفض إلى 1/e (حوالي 37 % ) من قيمته في السطح [36]. أبعد من هذا العمق ، التسخين الحجمي الناتج عن طاقة موجات الميكرو يكون مهملا . ويعطى عمق التوغل بالعلاقة التالية:

$$D_p = \frac{l}{2p(2e')^{\frac{1}{2}}} \left[ \left( 1 + \left( \frac{e''}{e'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22.II)$$

حيث  $\lambda$  طول الموجة العاملة ،  $e'$  ثابت العزل ،  $e''$  معامل الفقدان العزلي. تعطى سرعة (نسبة) ارتفاع درجة الحرارة  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  في المواد الخزفية، عندما يتم امتصاص طاقة موجات الميكرو بالعلاقة [36].

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P}{r(C_p)} \quad (23.II)$$

حيث  $\rho$  ، كثافة الخزف ( كلغم / م<sup>3</sup> )  
 $C_p$  السعة الحرارية ( كيلو جول / كلغم . م )

الجدول 1-II الخواص العزلية ، سمك الاختراق و درجة الحرارة لبعض المواد الخزفية

درجة الحرارة الحرجة	سمك الاختراق (سنتيمتر)	معامل الفقدان العزلي	زاوية فقدان العزلية	ثابت العزل	درجة الحرارة	التردد (GHz)	المادة الخزفية
800 م° 3.89-3.61 جيقاهرتز [36]	1.2	0.009	0.00010	8.9	25+ م°	2.45	ألومينا [37]
-	0.28	110	1.048	105	200+ م°	2.45	كربيد السيلكون [38]
-	3674.4	0.012	0.002	5.8	25+ م°	0.001	الملايت [39]
800-750 م° 5.17-4.96 جيقاهرتز [36]	0.5	0.01311	0.00300	4.37	25+ م°	8.52	نتريد البورون [36]
-	0.44	0.01994	0.00360	5.54	25+ م°	8.52	نتريد
-	8.13	0.015	0.022059	0.68	25+ م°	2.45	السليكون [36]
-	1.9	0.0001	0.00003	3.8	25+ م°	2.45	الكوارتز [37]

**II-6.1 الأطوار**

نتيجة ارتباط التسخين بموجات الميكرو، بالخواص العزلية، فإنه كلما زاد عدد الأطوار، داخل المادة المعالجة، فإن هذا يعقد أكثر من عملية المعالجة بموجات الميكرو، وهذا راجع لاختلاف الخواص العزلية، لكل طور على حدة، إن البنية الجزيئية، تؤثر على مقدرة موجات الميكرو، على التفاعل مع المواد وتحويل الطاقة، عندما توصل المواد ذات الخواص العزلية المختلفة ببعضها البعض، تتزاوج موجات الميكرو مع المادة أو الطور الأكثر فقداناً لعازليتها، مطورة شروط درجة حرارة محلية. فإذا كان الاختلاف كبير في معامل فقدان لكل منها، مع عدم تجانس في توزيعها بالنسبة لبعضها البعض، فإن ذلك قد يؤدي إلى ظهور تسرب حراري متموضع، والذي قد يتسبب في إنتاج توترات عالية بكفاية، تحدث تصدع في المادة.

**II-7.1 نظام العزل الحراري**

يعتبر وجود نظام العزل الحراري، عند التسخين بموجات الميكرو، ضروري ومهم. وهذا من أجل تسخين مستقر للمواد المعالجة، حيث أن ضياع الحرارة، عبر المساحات الجانبية للمادة، يمكن أن يؤدي إلى معامل فقدان متغير داخل المادة. ينتج عنه تسخين غير مستقر للمادة، هذا من جهة ومن جهة أخرى، يعمل نظام العزل الحراري، على حفظ الحرارة داخله من الضياع، وبذلك الوصول إلى درجات حرارة عالية في وقت وجيز. كما أن ارتفاع درجة حرارة المادة المعالجة، يرفع من معامل فقدان هذه الأخيرة، وبالتالي يساعد على تفاعل المادة بشكل أفضل مع موجات الميكرو. حيث أثبتت الأبحاث أنه بالتقريب كل الحالات المعروفة، والتي كان فيها التليد ناجح بشكل كبير، كان لها أنظمة عزل حراري (insulation)، مصممة بعناية. كما أن ارتفاع درجة الحرارة، في غرف المعالجة، قد يؤدي إلى تلف أجهزة موجات الميكرو المستعملة. في المعالجة بموجات الميكرو للخزفيات، غالباً ما يكون لهذه الأخيرة، تدرجات حرارية عكسية (مقلوبة)، ناتجة عن فقدان الحرارة بالإشعاع والحمل، من سطح الخزفية إلى الحجرة غير المسخنة. إن الخزفيات حساسة بالخصوص للتدرجات الحرارية، لأن التوترات الحرارية، يمكن أن تكون عالية بكفاية، لتبدأ تصدع (تشقق) في الخزفيات الهشة. ولهذا ومن أجل تجنب هذه التدرجات العكسية، وأثرها على الخزفيات تستعمل أنظمة عزل حراري تمنع تسرب الحرارة إلى الحجرة الباردة. في الحقيقة يمكن للتدرجات الحرارية، داخل المادة المعالجة بموجات الميكرو، تقليصها بشكل كبير بوجود نظام عزل حراري فعال، كما أنه ومن أجل إستعمال نظام تسخين هجين للمواد، يستعمل نظام العزل الحراري، من أجل حبس الحرارة المولدة بالسيسيبتور (عنصر التسخين) داخله، وانتقالها عن طريق الإشعاع الحراري (الأشعة مافوق الحمراء) عبر الحمل، إلى العينات، ومن ثم ترفع من درجة حرارة هذه الأخيرة، لتصبح قادرة على التزاوج مع موجات الميكرو لتسخن ذاتياً. يعتبر تطوير نظام عزل حراري فعال، قابل للعمل عند درجات حرارة عالية، للخزفيات، من أهم التحديات، في مجال المعالجة بموجات الميكرو [40]. في الحقيقة لا يوجد مواد عازلة، شفافة لموجات الميكرو قادرة

على العمل في مجال 2000 م°، حتى لو كان  $Y_2O_3$  الحبيبي، أظهر بعض الوعود في هذا المجال. لا بد لنظام العزل الحراري، لكي يكون ناجع وذو فاعلية، أن يكون مصنوع من مادة ذات كثافة منخفضة وضياح عزلي ضعيف جدا. مع ناقلية حرارية ضعيفة كذلك، وهذا من أجل أن يكون شفاف لموجات الميكرو، وحتى لا تضيع الحرارة من خلال الحمل والنقل عبر جدران نظام العزل الحراري. يجب التأكيد أنه لا توجد مواد نقية 100% ولهذا فإنه لا يمكن أن تكون هناك مواد شفافة، 100% لموجات الميكرو، خاصة عند درجات الحرارة العالية.

## II-8.1 التسخين الهجين

إن العديد من المواد، لديها خواص عزلية، لا تتناسب والمعالجة بموجات الميكرو عند درجة حرارة الغرفة. حيث أن مواد مثل أكسيد السليكون  $SiO_2$  و الألومينا  $Al_2O_3$  و نتريد السليكون  $Si_3N_4$ ، ضعيفة الامتصاص لموجات الميكرو، إلى غاية درجة حرارة حرجة ( $T_c$ )، فوق هذه الدرجة، يبدأ معامل فقدان العازلية بالزيادة وتبدأ المادة بالتزاوج مع موجات الميكرو [41]. إن الخزفيات التي يجب عليها بلوغ درجة الحرارة الحرجة، قبل أن تتزاوج مع موجات الميكرو، تبدي بعض الصعوبات في المعالجة.

قبل بلوغ درجة الحرارة الحرجة، لدى هذه المواد معاملات فقدان منخفضة جدا، وبالتالي تسخن في حقل موجة الميكرو ببطء شديد. عندما تعالج الخزفيات في حقول كهرومغناطيسية غير منتظمة، فإن درجة الحرارة الموضعية (المحلية) تتغير داخل المادة. إذا بلغ حجم موضعي (محلي) درجة الحرارة الحرجة قبل باقي المادة، فإن هذه المنطقة (الحجم المحلي) تبدأ في التسخين بسرعة أكبر، ودرجة الحرارة تبدأ في الارتفاع أكثر فأكثر. يمكن أن ينتج عن هذا تسرب حراري (انفلات حراري) متموضع، الذي يتسبب في إنتاج توترات عالية بكفاية لإحداث تصدع بالمادة [42]، هذه الظاهرة أدت إلى تطوير التسخين الهجين أين المادة يتم تسخينها في البداية باستعمال مصدر تسخين خارجي مستقل، لما تسخن المادة إلى درجة حرارة حرجة ( $T_c$ )، امتصاص موجات الميكرو من طرف المادة يصبح كافيا ليسبب التسخين الذاتي، هذه الطريقة الهجينة يمكن أن تؤدي للوصول إلى توزيع درجة حرارة أكثر انسجاما، مما يمكن الوصول إليه باستعمال موجات الميكرو لوحدها أو الطرق التقليدية فقط، هذا الانسجام هو نتيجة التسخين الحجمي بموجات الميكرو والتقليل من فقدان الحرارة. التسخين الهجين يمكن إنجازه باستعمال مصدر حرارة مستقل، مثل فرن غاز أو فرن كهرباء، بالتركيب مع فرن موجات الميكرو، أو عبر استعمال سسبيبتور خارجي، من مادة شديدة التزاوج مع موجات الميكرو، ذات فقدان عزلي كبير عند درجة حرارة الغرفة، ككربيد السليكون (SiC) حيث تقوم بتسخين غير مباشر للمادة، التي بدورها ترفع درجة حرارتها، لتصبح قادرة على التسخين مباشرة بموجات الميكرو.

**9.1-II قياس الخواص العزلية للمواد**

تتحكم الخواص العزلية للمواد، كما سبق الإشارة إليه، في مقدرة هذه الأخيرة على امتصاص موجات الميكرو، وتحويلها إلى حرارة، ولهذا السبب فإن قياس هذه الخواص، كدالة في درجة الحرارة، التردد ومعاملات أخرى، وثيقة الصلة بالموضوع يكون مهما. العديد من الباحثين [43-44] درسوا تقنيات مختلفة لقياس الخواص العزلية، عند ترددات الميكرو.

تعتبر تقنيتي حجرة التجاوب، أو طريقة حجرة الاضطراب (quavity perturbation method)، وطريقة الإرسال و الانعكاس، من أهم التقنيات المستعملة، في قياس الخواص العزلية للمواد. في طريقة حجرة التجاوب، نسبة الطاقة المخزنة داخل الحجرة، إلى الطاقة الضائعة (وهي ما يعرف غالبا بمعامل النوعية Q) تقاس في حجرة فارغة، بداخلها مادة صغيرة الحجم. بسبب أن أنظمة موجات الميكرو، غالبا ما تصمم بالاعتماد على استبدال مكونات النظام بدارات كهربائية مكافئة [7]، فإن المعامل Q مؤسس على نظرية التجاوب RLC (مقاومة - وشيعة - مكثفة). يعطى المعامل Q لدارة RLC على التسلسل بالعلاقة التالية [45]:

$$Q = R \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (19.II)$$

إن إضافة العينة داخل الحجرة، يخلق اضطرابا في الحقل الكهرومغناطيسي، ويغير كل من C ، L ، R وبسبب ذلك تتغير ممانعة الدارة المكافئة. إن التغيرات الحاصلة في معامل النوعية Q، وتردد التجاوب يمكن أن يعزى، إلى ثابت العزل وظل (زاوية) الضياع (الفقدان) للمادة. أما في طريقة الإرسال و الانعكاس، توضع المادة في موجه موجة، ويدرس طور وسعة الموجات المرسلية والمنعكسة. الاختلافات الحاصلة على المستوى هذه الموجات، تعطي معلومات على الخواص العزلية للمادة.

**II- 2 تطبيقات التسخين بأموال الميكرو**

لقد أصبح الاهتمام يتزايد على استعمال التسخين بموجات الميكرو لمعالجة المواد، حيث أن هناك أعمال كثيرة، حاولت استعمال موجات الميكرو لمعالجة مجال واسع من المواد ، منها الخزفيات والبوليميرات ، الخلائط والمعدنيات ولقد أخذت الأبحاث المتعلقة بالخزفيات، حصة واسعة من تلك الأعمال . بسبب أن الخزفيات تملك ناقلية حرارية منخفضة، وتعالج عند درجات حرارة مرتفعة، وحساسيتها للتدرجات الحرارية العالية ونتيجة أن التسخين بموجات الميكرو، يتولد في حجم المادة بكامله ولا يعتمد على انتشار الحرارة من السطوح، إلى داخل المادة وبالتالي يمكن بلوغ تسخين متجانس وسريع في المواد السميكة نسبيا ، كما أن المعالجة بموجات الميكرو، أثبتت أنها تعطي للمواد المعالجة بها خواص جيدة مقارنة، بالتسخين التقليدي بالإضافة إلى ما يوفره التسخين بموجات الميكرو، من تقليص في أزمنة المعالجة والاقتصاد في الطاقة. نحاول الآن أن نستعرض، أعمال بعض الباحثين، في مجال معالجة الخزفيات بموجات الميكرو . وأهم النتائج التي توصلوا إليها .

**II- 1.2 عمل داركور وفريقه [46]****II- 1.1.2 العمل المنجز**

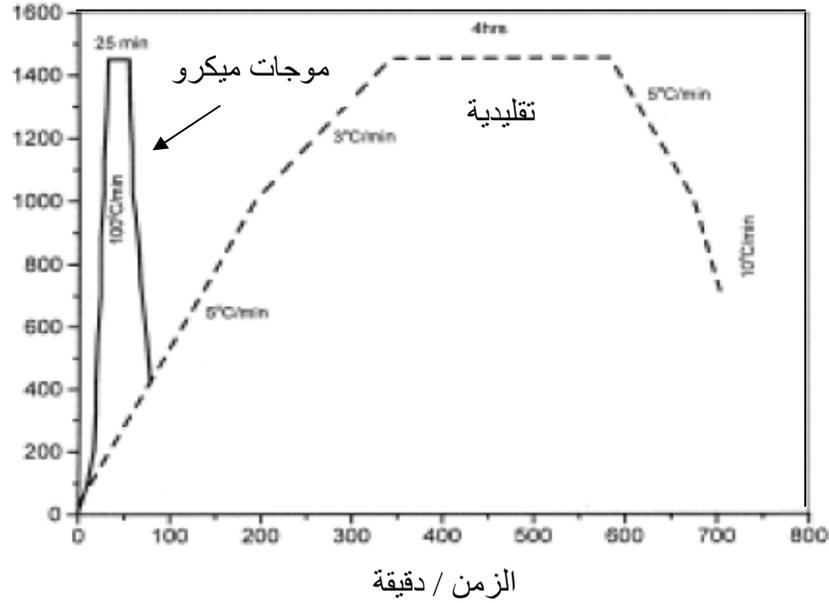
قام الفريق المكون من داركور وبراكاش، من مختبر الحالة الصلبة الهندي، وأقراوال من مختبر البحث في المواد، بينسلفانيا بأمريكا، عام 2002، بتلييد مسحوق تيتانات الباريوم  $BaTiO_3$  بالمعالجة بموجات الميكرو.

**II- 2.1.2 العمل التجريبي المتبع**

تم تحضير المسحوق الابتدائي، من  $BaTiO_3$  انطلاقا من  $TiO_2$  و  $BaCO_3$ ، حيث تم سحق خليط من هذين المسحوقين بنسب ثابتة، في ماء مقطر باستعمال كريات الزركونيا ، جفف المسحوق الناتج وتمت كلسنته عند  $1050^{\circ}C$  لمدة 4 ساعات ، المسحوق المتفاعل الناتج تم سحقه ثانية، ثم أعيدت كلسنته عند  $1100^{\circ}C$  لمدة 4 ساعات للحصول على مسحوق أكثر تجانس ، تم ضغط المسحوق على شكل أعمدة، تحت ضغط  $200\text{ MPa}$  باستعمال جهاز ضغط إيزوستاتيك على البار .

من أجل التلييد التقليدي (CS) ، مجموعة من هذه العيدين تم تلييدها عند  $1450^{\circ}C$  لمدة 4 ساعات تحت جو هوائي والدورات الكاملة للتسخين كانت 700 دقيقة . مجموعة أخرى من العيدين تم تلييدها باستعمال فرن موجات الميكرو بمطبق متعدد الأنماط يعمل بتردد 2.45 جيقاهيرتز واستطاعة خروج كلية قدرها 3 كيلواط عند الدرجة  $1450^{\circ}C$  لمدة 25 دقيقة وبسرعة تسخين قدرها  $100^{\circ}C$  / دقيقة ودورة التسخين كاملة كانت 90 دقيقة فقط .

درجة الحرارة / م°



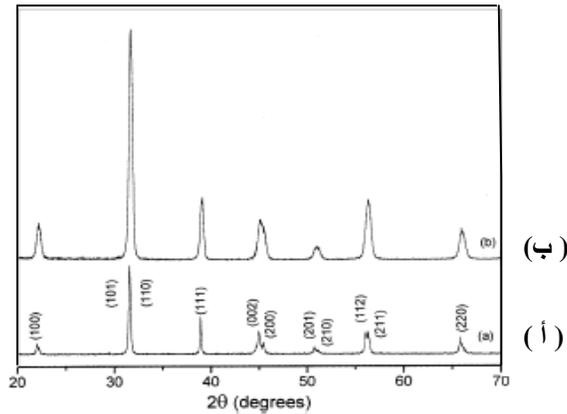
**الشكل II-8** مقارنة بين الوقت المستغرق للمعالجة بموجات الميكرو والمعالجة التقليدية

الكثافة والبنية المجهرية الدقيقة، للعينات المعالجة بموجات الميكرو وبالطريقة التقليدية ، تم التحصل عليها بواسطة طريقة مبدأ أرخميدس والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) على التوالي. نقاوة الطور في العينات الناتجة تم التحقق منها، باستعمال تقنية انعراج الأشعة السينية  $\times$ ، مخططات XRD تم تسجيلها في مجال من  $2\theta$  (  $20^\circ$  إلى  $70^\circ$  ) بسرعة مسح تقدر ب  $2^\circ$  م / دقيقة . لقياس الخواص الكهربائية، تم تقطيع العيدين الملبدة، لصنع عينات ذات سمك 0.5 مم وقطر 10 مم، تم رش وجوه العينات بطبقة من البلاتين. تم قياس السعة و  $\tan\delta$ ، بواسطة جهاز HP 4284A LCR meter ،متصل بجهاز كمبيوتر، بدلالة التردد، من 100 هرتز إلى 1 ميغاهيرتز ودرجة الحرارة من  $25^\circ$  م إلى  $200^\circ$  م . الاستقطاب بدلالة الحقل، تم تأطيره باستعمال حقل AC ذو 25 إلى 30 kV/cm وبتردد 50 هرتز .

### II- 3.1.2 أهم النتائج المتحصل عليها

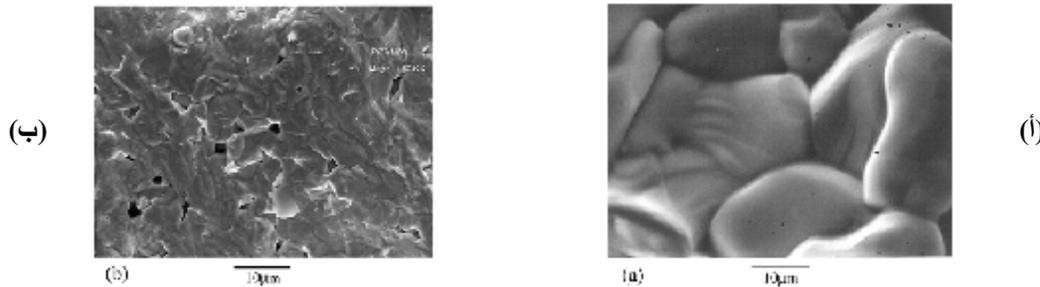
تحصل ماكور وفريقه، على نسبة تلبيد تقدر ب 97 %، بالنسبة للعينات الملبدة بموجات الميكرو، في حين كانت هذه النسبة تقدر ب 94 %، من أجل العينات الملبدة بالطريقة التقليدية . هذه النتائج توضح كذلك أن المعالجة بموجات الميكرو، أخذت فقط جزء من الوقت اللازم للطريقة التقليدية، للوصول لمادة كثيفة ذات طور واحد وتلبيد أحسن. أظهرت مخططات XRD لمختلف العينات، المعالجة بموجات الميكرو أو بالطريقة التقليدية، تكون طور أحادي مع بنية (تركيبية) مربعة (Tetragonal structure) وأبعاد الشبكة والنسبة  $c/a$  .

وجدت أنها أعلى قليلا بالنسبة للعينات الملبدة بموجات الميكرو، فسر الفريق ذلك بأن التليد بموجات الميكرو ينتج عن تليد متسارع وانسجام أحسن [47] حجم وحدة الخلية يزداد من  $63.79 \text{ \AA}^3$  بالنسبة للعينات الملبدة بالطريقة التقليدية، إلى  $64.14 \text{ \AA}^3$  للعينات الملبدة بموجات الميكرو .



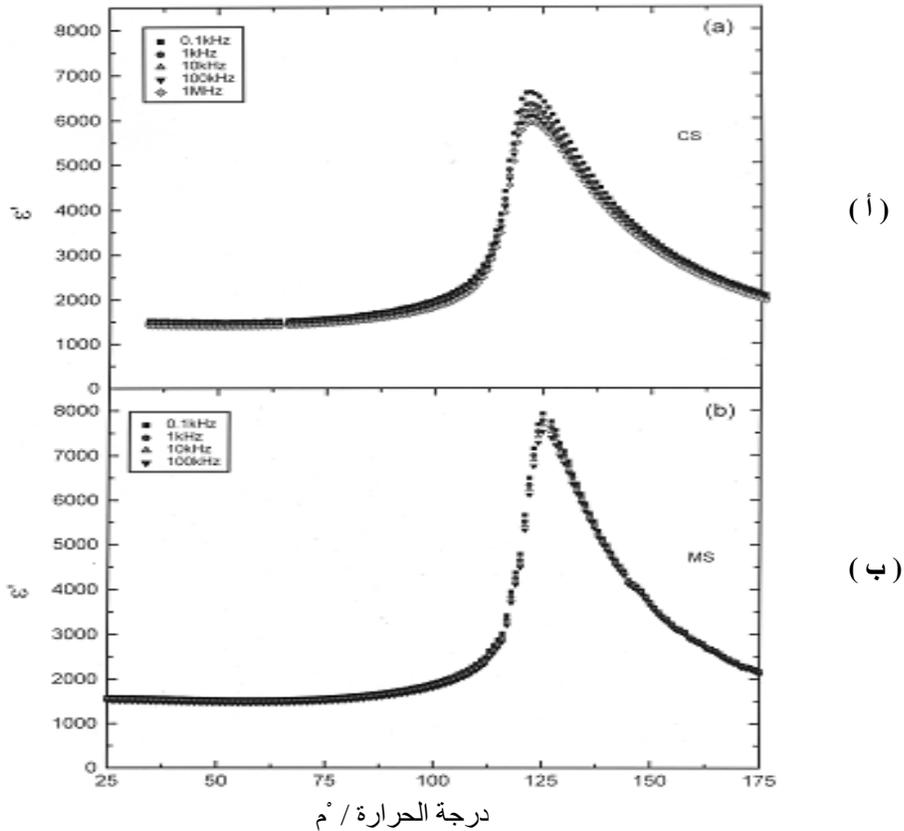
**الشكل II-9** طيف انعراج الأشعة السينية لتيتانات الباريوم ( أ ) معالج بالطريقة التقليدية ( ب ) معالج بموجات الميكرو

لاحظ الفريق، أن البنية المجهرية للعينات الملبدة، تظهر أن حجم الحبيبات هو على انسجام متساوي بالنسبة لجميع العينات، حيث أن حجم الحبيبات المتوسط يتراوح ما بين 6 و 12 ميكرو متر، ويكون صغير في حالة العينات المعالجة بموجات الميكرو. مشيراً إلى أن حدود الحبيبات كانت حادة في هذه الأخيرة، كما أن العينات المعالجة بهذه الأخيرة، بها فجوات أقل من العينات المعالجة بالطريقة التقليدية، على الرغم من أنها تظهر بعض الفجوات الحرة . افترض الفريق أن سرعة العملية (التليد)، بالنسبة للمعالجة بموجات الميكرو تحد من نمو الحبيبات وتعطي بنية مجهرية متجانسة ( الشكل II-10) والذي يعتبر حسب الفريق شيء جذاب لمعالجة الخزفيات الكهربية [48].

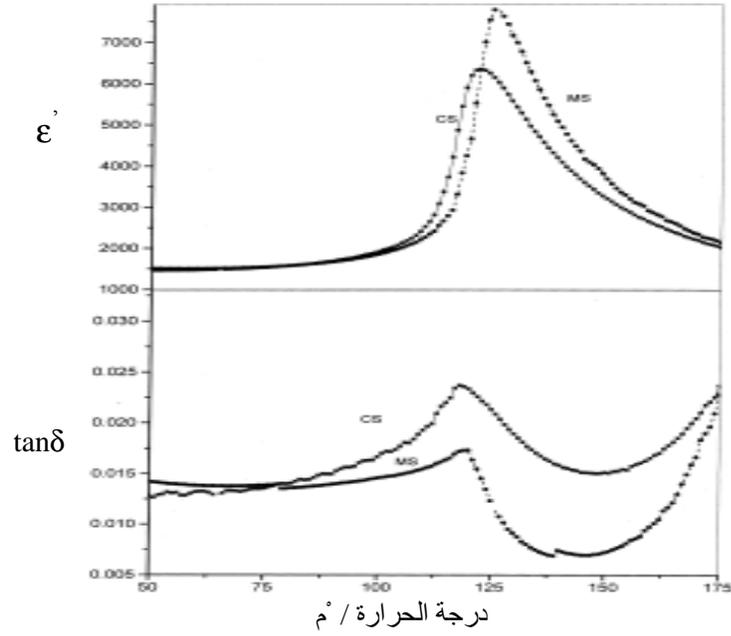


**الشكل II-10** البنية المجهرية لتيتانات الباريوم معالجة ( أ ) تقليدية ( ب ) موجات الميكرو

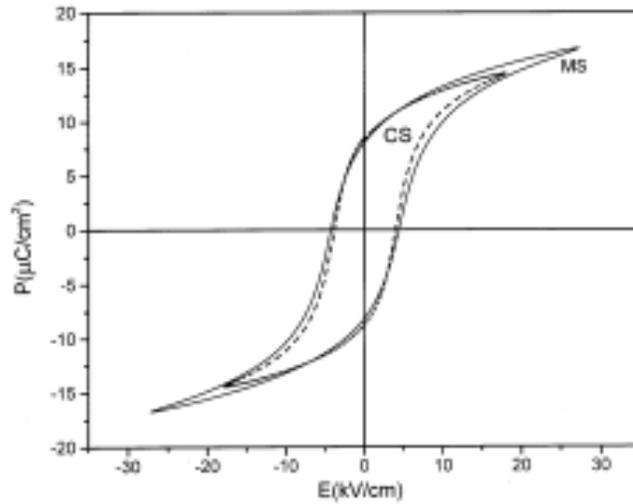
التركيبية المدروسة في هذا العمل، تظهر ققم حادة، في منحنى ثابت العزل النسبي بدلالة درجة الحرارة، والذي هو من خصائص المواد الفيرو كهربائية . منحنى ثابت العزل بدلالة درجة الحرارة في عدة ترددات من أجل العينات الملبدة بموجات الميكرو أو تلك الملبدة بالطريقة التقليدية (الشكل II-11) تظهر أنه لا يوجد تغير في الحد الأعلى للعازلية ، لقد وجد الفريق أنه عند مقارنة منحنيات تغيرات ثابت العزل ومعامل التبدد عند التردد 1 KHz لتيتانات الباريوم ،المعالجة بموجات الميكرو والمعالجة بالطريقة التقليدية، أن قيمة ثابت العزل تكون أكبر في المعالجة بموجات الميكرو عنها بالطريقة التقليدية. و درجة حرارة كوري تكون عند 125 م° في المعالجة بموجات الميكرو في حين تكون عند 122 م° في المعالجة التقليدية . كما أن معامل التبدد، يكون أقل في المعالجة بموجات الميكرو، عنها في المعالجة التقليدية . لقد تم ملاحظة كذلك أن سعة الحقل  $E_c$ ، هي أعلى قليلا في العينات المعالجة بموجات الميكرو .



الشكل II-11 تغيرات ثابت العزل مع درجة الحرارة ومن أجل ترددات مختلفة (أ) معالجة تقليدية (ب) معالجة بموجات الميكرو



الشكل 12-II تغيرات ثابت العزل وزاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لـ BT عند التردد 1 KHz .  
(CS) معالجة تقليدية ، (MS) معالجة بموجات الميكرو



الشكل 13-II تغيرات الاستقطاب مع الحقل الكهربائي (CS) معالجة تقليدية (MS) موجات الميكرو

## 3.2-II عمل كساي وفريقه [49]

## 1.3.2-II العمل المنجز

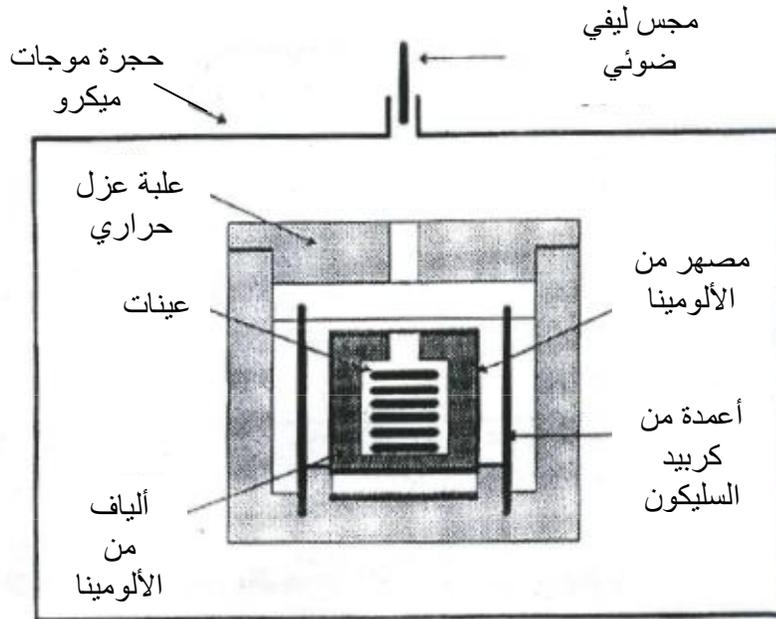
قام كساي وفريقه ،من جامعة بيجينيا بالصين ،عام 1998 م، بدراسة سلوك التلييد لثلاث أنواع من الخزفيات ذات معاملات فقدان عزلية مختلفة، باستعمال موجات الميكرو . المواد الثلاثة المدروسة، هي الزركونيا ( $ZrO_2$ ) المستقر بالإيتريوم (Y) والسيريوم (Ce) . و الألومينا ( $Al_2O_3$ ) عالي النقاوة (99.97% ) . و PMZNT ( مادة حديدية الكهربائية ذات قاعدة رصاصية تركيبها  $xPb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-zPbTiO_3$  )

## 2.3.2-II العمل التجريبي المتبع

قام الفريق باستعمال نظام تلييد يشتمل على فرن موجات ميكرو يشتغل تحت تردد 2.45 جيجا هيرتز ومزود بمنبع موجات بإستطاعة متغيرة من 0.5 إلى 5 كيلوواط وبحجرة تسخين متعددة الأنماط وذات أبعاد (48 سم × 43 سم × 38 سم ) ودعمت هذه الأخيرة بنظام تبريد مائي لتقاوم التشوه الحراري أثناء التلييد عند درجات الحرارة العالية.

استعمل الفريق أعمدة من مادة كربيد السليكون كعنصر تسخين (سسيبتور) من أجل تسخين أولي (تسخين هجين) للعينات ذات الفقدان العزلي المنخفض عند درجات الحرارة المنخفضة . الشكل II-11 يوضح منظومة التسخين الهجين المستخدمة . قياس درجة حرارة التسخين كان في المجال 500 إلى 2000 م° باستعمال مقياس ضوئي يتحسس الأشعة ما تحت الحمراء البعيدة .

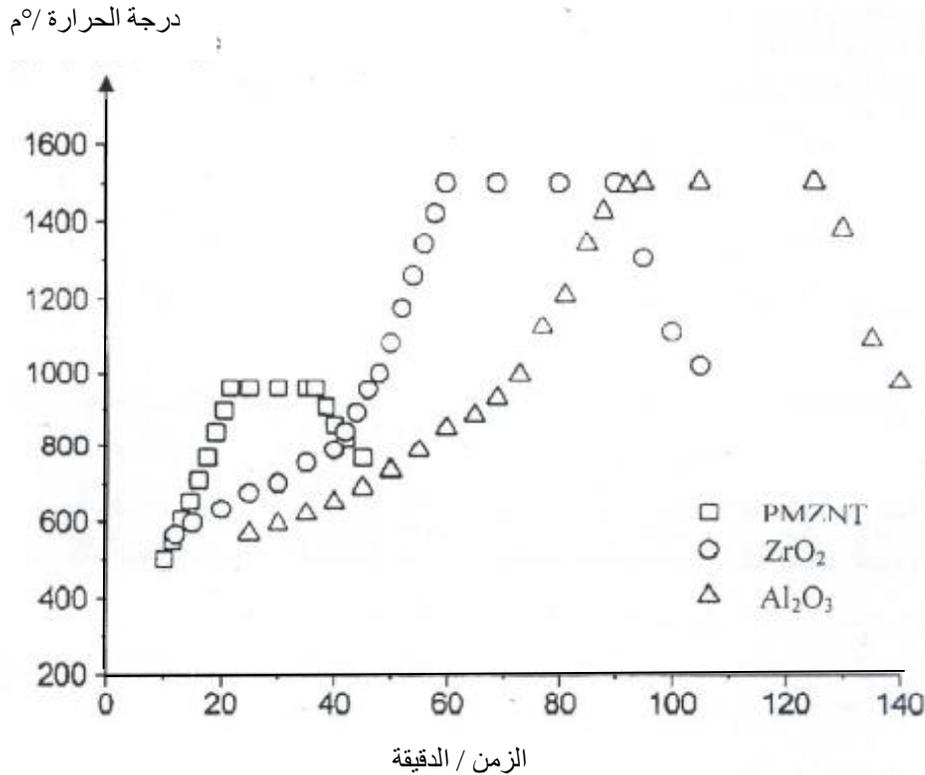
من أجل المقارنة قام الفريق بتلييد نفس المساحيق بالطريقة التقليدية بسرعة تسخين تقرب 200 م° / ساعة.



الشكل II-14 بنية التسخين الهجين ( المباشر والغير مباشر ) بموجات الميكرو.

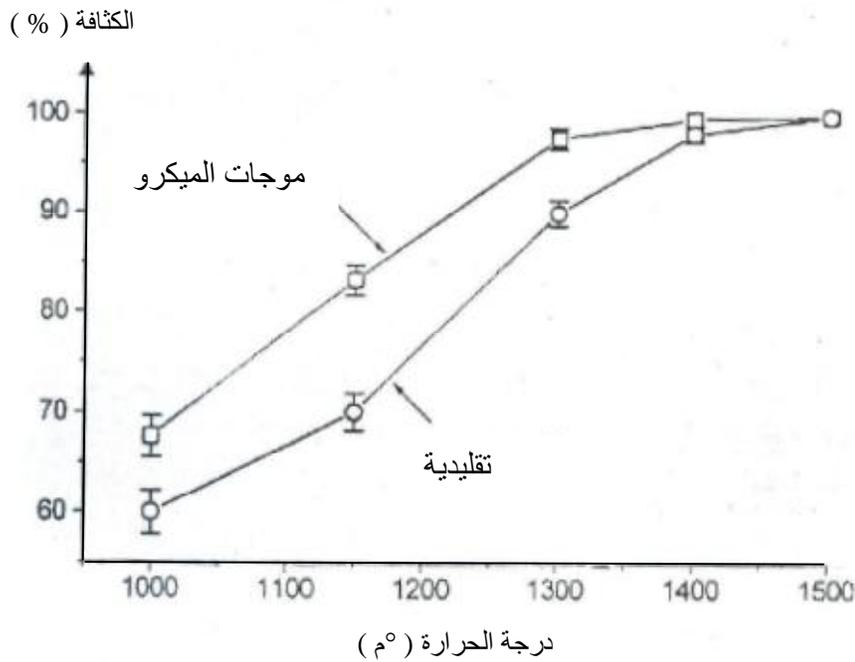
## 3.3.2-II أهم النتائج المتحصلة

قام الفريق، بتطبيق استطاعة خروج متدرجة، حيث عملوا باستطاعة تقدر بـ 500 واط، في البداية لمدة بضعة دقائق، ثم رفعت بالتدريج حتى الوصول إلى درجة حرارة التليد المطلوبة، وهذا حتى يتجنب تشقق العينات. منحنيات دورات التسخين للمواد الثلاث، مبينة في الشكل II-15. لاحظ الفريق، أنه قد تم بلوغ درجة حرارة عالية 50 م°/ دقيقة بالنسبة للمادة PMZNT، أرجع الفريق سبب سرعة التسخين العالية، هذه أن المواد ذات البنية البيروفسكايت (Perovskite) تبدي فقدان عزلها قويا، بالخصوص الفقدان الثنائي القطب (الفقدان بألية إعادة توزيع ثنائيات القطب). غير أن التسخين بموجات الميكرو للـ  $Al_2O_3$  و الـ  $ZrO_2$  يتعلق أساسا بالفقدان الناقلي، (الفقدان بألية تدفق تيار النقل) [50] كذلك تملك المادتان فقداننا ناقلها منخفضا مقارنة بالخزفيات النصف الناقل والخزفيات حديدية الكهربية (الفيرو كهربية)، خاصة عند درجات الحرارة المنخفضة. لهذا السبب لاحظ الفريق سرعة تسخين منخفضة في حالة الـ  $Al_2O_3$  و الـ  $ZrO_2$ ، عند درجات الحرارة الواطئة. أثناء فترات التسخين هذه، كان تسخين العينات قادمًا أساسا من السيسيتور المكون من أعمدة كربيد السليكون (SiC). لأن هذه المادة تبدي قابلية أكثر قوة لامتصاص موجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة، مقارنة بقابلية امتصاص العينات عند درجة الحرارة الواطئة.

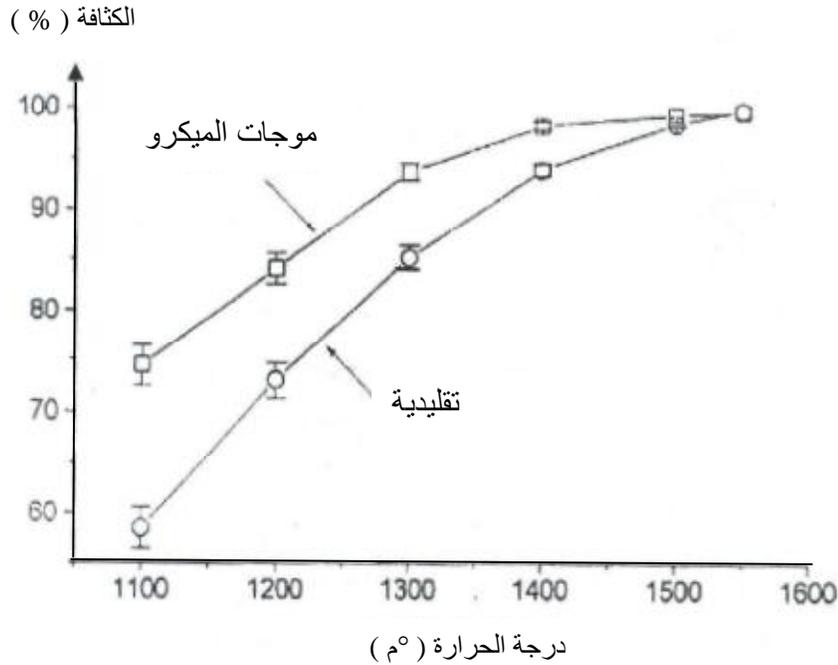


الشكل II-15 منحنيات التسخين النموذجية بموجات الميكرو للمواد الثلاثة.

هذه القابلية تستمر، إلى غاية وصول درجة حرارة العينات الى درجة الحرارة الحرجة  $T_c$ ، أين تقترن (تتزاوج) العينات بحقل موجات الميكرو بأكثر فاعلية، ويتم الحصول على سرعة تسخين عالية، هذه الأخيرة تنتج عن الارتفاع السريع للناقلية الأيونية، وقابلية الامتصاص [51]. في هذه الشروط من درجة الحرارة يبقى عمق التوغل كاف لموجات الميكرو داخل العينات . غير أن عمق توغل موجات الميكرو، لأعمدة كربيد السيلكون، ينخفض بشدة، من 4 سنتمتر عند الدرجة 22 م°، إلى 0.4 سنتمتر عند 695 م° [51]. تسخين العينات يكون أقل مقارنة بالتسخين عند درجة الحرارة المنخفضة نسبيا. تؤكد كساي وفريقه ، عن طريق القياس ، أن العينات أظهرت درجة حرارة أعلى بكثير، من درجة حرارة أعمدة كربيد السيلكون، أثناء مراحل التلييد. كشفت هذه النتائج للفريق، أنه تم إنتاج تلييد بموجات الميكرو، للعينات أساسا بواسطة تفاعلها مع الحقل الكهرومغناطيسي ( التسخين المباشر للعينات بموجات الميكرو ) .

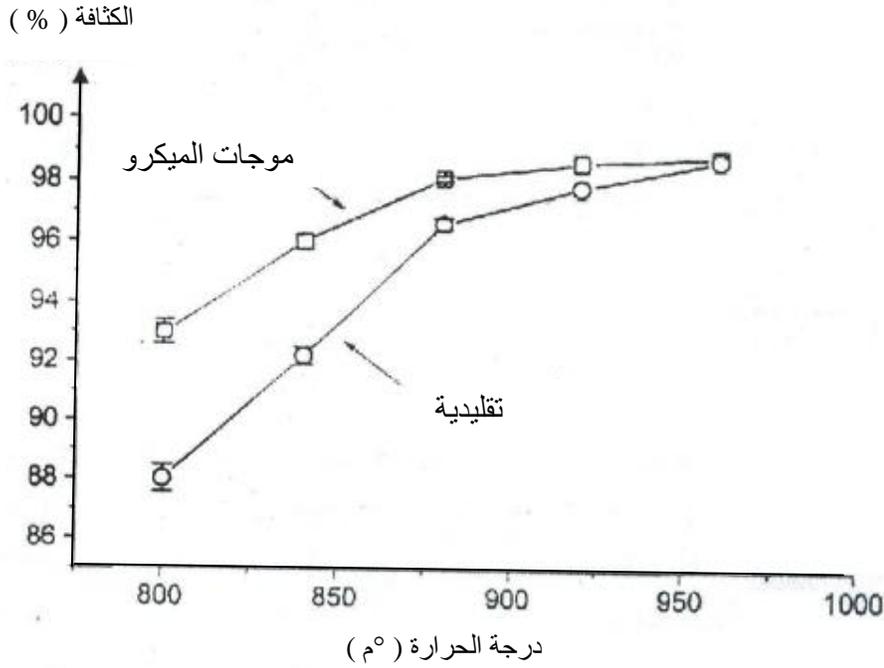


الشكل II-16 تغير الكثافة مع درجة حرارة التلييد للألومينا ( $Al_2O_3$ )



الشكل II-17 تغير الكثافة مع درجة التلييد للـ  $Ce - Y - ZrO_2$

أدى تلييد سريع بموجات الميكرو لمادة الـ PMZNT، حديدية الكهربائية، بزمن مكوث يقدر بـ 15 دقيقة إلى بلوغ كثافة أعلى بكثير مقارنة بالتلييد بالطريقة التقليدية، بزمن إبقاء طويل قدره 4 ساعات وهذا من أجل درجات الحرارة المنخفضة نسبياً. يرى كساي وفريقه أن الفقدان ثنائي القطب، والفقدان الناقلي المعتبرين هما المسؤولان، عن معدل التجفيف السريع الملاحظ. سجل الفريق مع ذلك أن الفرق في الكثافة بين التلييد بموجات الميكرو، والتلييد التقليدي، تؤول إلى التناقص، مع زيادة درجة الحرارة، بالنسبة لجميع المواد (الأشكال II-16، 17، و18)، وفي الأخير حصل الفريق على نفس الكثافة تقريباً عند درجة الحرارة النهائية. هذا يقتضي أن التسخين بموجات الميكرو يسرع التكتيف، يدخر زمن التلييد أو يقلل من درجة الحرارة، لكن لا يظهر بلوغ كثافة أعلى مقارنة بالطريقة التقليدية، عند درجة حرارة التلييد النهائية، أشار الفريق إلى أنه تم ملاحظة نتائج مماثلة من طرف باحثين آخرين [24]. عمل سابق لكساي وفريقه على Y-TZP، أظهر كذلك أن العينات الملبدة بطريقة موجات الميكرو، وبالطريقة التقليدية، كان لديها نفس الكثافة، المقدرة بـ 96% من الكثافة النظرية، عند درجة الحرارة النهائية.



الشكل II-18 تغير الكثافة مع درجة حرارة التلييد للـ PMZNT

## II-3.2 عمل فال وفريقه [52]

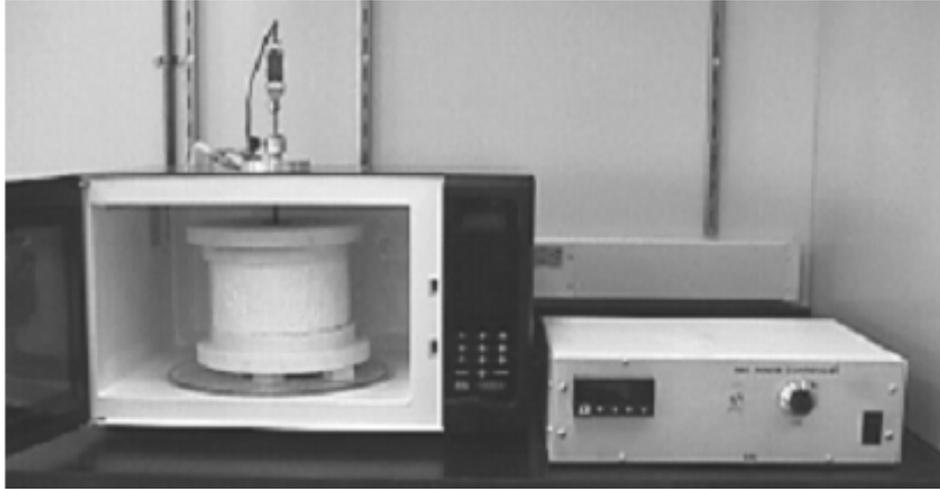
### II-1.3.2 العمل المنجز

قام فال وفريقه، من كلية الخزفيات، جامعة أxford، سنة 2002، بتلييد عينات من الزركونيا و الألومينا باستعمال موجات الميكرو .

### II-2.3.2 العمل التجريبي المتبع

قام الفريق باستعمال نظام تلييد، يشتمل على فرن موجات ميكرو معدل، يشتغل تحت تردد 2.45 جيغا هرتز ومزود بمنبع موجات ذو استطاعة متغيرة ، وتتمثل التعديلات في نظام تبريد بالماء، وإدخال مزدوج حراري من الصنف S و جهاز للتحكم والتعديل ، كما يتضمن النظام على علبة عزل حراري، ذات كثافة منخفضة وضياح عازلي منخفض جدا وهذا حتى تكون شفافة لموجات الميكرو، حيث تعبر من خلالها موجات الميكرو مع تداخل ضعيف، لتقوم بتسخين العينات بداخلها، وتقوم العلبة بحبس الحرارة المتولدة عن العينات في الداخل. استعمل الفريق سسبيكتور من مادة كربيد السليكون كعنصر تسخين ، من أجل تسخين أولي (تسخين هجين) للعينات ذات الفقدان العازلي المنخفض، عند درجات الحرارة المنخفضة ، وذلك إلى أن يصبح الفقدان العازلي في الخزف عالي كفاية، لكي يتزاوج مباشرة مع الحقل . والشكل II-19 يوضح منظومة التسخين الهجين المستخدمة .

قام الفريق بتحضير العينات، من مسحوق الزركونيا ذو حبيبات صغيرة (أقل من الميكرون ) المستقر بـ 3 % مول من الإيتريوم وكذلك عينات من الألومينا ، تم كبس كمية من 5 غرام في قالب قطره 2.5 سنتيمتر. قام الفريق بتلييد العينات وذلك برصها فوق بعضها ، داخل علبة العزل الحراري ، بحيث تكون وسط عنصري تسخين من كربيد السليكون ( SiC ) متقابلين ، أين كل واحد منهما يكون على أحد جانبي العينات ( الشكل II- 20). بعد وضع العلبة داخل فرن موجات الميكرو، يتم برمجة الفرن وتشغيله بحيث يتم تغيير استطاعته يدويا على خطوات ، ويتم قياس درجة الحرارة كل دقيقة ، لما ينتهي التشغيل يتم فتح باب الفرن ورفع العلبة و تترك العينات تبرد لمدة 40 دقيقة قبل إخراجها . أما العينات الملبدة في فرن تقليدي فيتم معالجتها عند 1500 م° للزركونيا و1600 م° للألومينا بسرعة تسخين 5 م° / دقيقة وذلك لمدة ساعة كاملة، ثم يتم تبريدها بسرعة 20 م° / دقيقة. الكثافة تم حسابها بواسطة طريقة مبدأ أرخميدس ، والبنية المجهرية الدقيقة للعينات المعالجة بموجات الميكرو ، وبالطريقة التقليدية تم التحصل عليها بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) ، وهذا بعد صقلها ومعالجتها حراريا من أجل إظهار الحدود الحبيبية.



الشكل II-19 منظومة التسخين المستخدمة

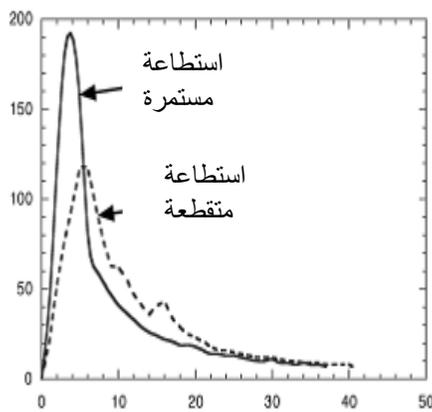


الشكل II-20 عنصرا تسخين داخل تجويف العازل الحراري

### 3.3.2-II أهم النتائج المتحصل عليها

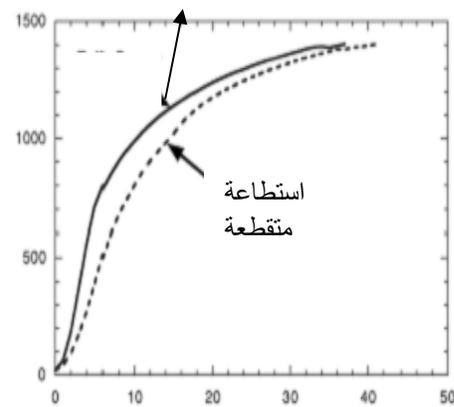
لقد قام الفريق، بمقارنة التلييد باستعمال التشغيل باستطاعة قصوى، والتلييد باستعمال التشغيل باستطاعة على خطوات، لعينات الزركونيا و الألومينا ، حيث وجدوا أن التسخين باستطاعة على خطوات، أنتج في البداية درجة حرارة منخفضة ، وهذا راجع لسرعة التسخين البطيئة ، في حين كانت باستعمال الاستطاعة القصوى عالية بعض الشيء، لكن الفريق لاحظ أن كلا من درجة الحرارة، وسرعة التسخين كانتا متماثلتين بعد 40 دقيقة في الطريقتين . كما لاحظ الفريق أن العينات الملبدة باستطاعة قصوى، أو باستطاعة على خطوات، كانت لهما كثافة متشابهة ، كما أن استهلاك الطاقة الإجمالي يكون في التشغيل على خطوات أقل من التشغيل باستطاعة قصوى . وهذا يوحي أن سرعة التسخين الابتدائية العالية لا توفر ميزات في ربح الزمن أو الطاقة ، إلا إذا كان نظام التسخين له قدرة كافية للإبقاء، على سرعة عالية تحت درجة حرارة عالية.سرعات التسخين في الشكل II-21 موضحة بدلالة درجة الحرارة في الشكل II-22 .

سرعة التسخين  
د.م / دقيقة



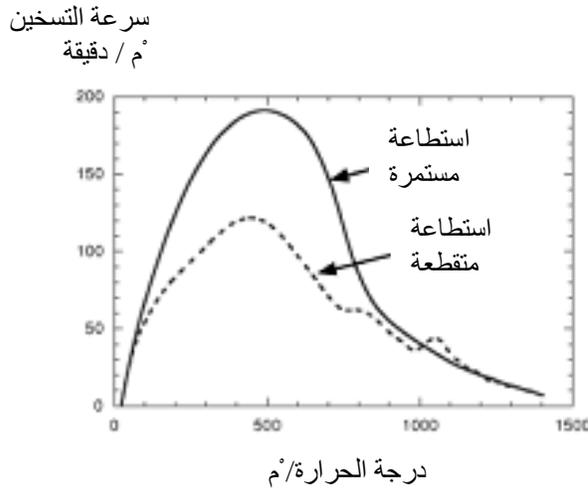
الزمن (دقيقة)

استطاعة  
مستمرة  
درجة الحرارة  
د.م



الزمن (دقيقة)

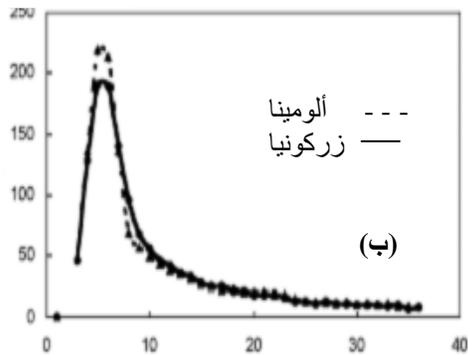
الشكل II-21 درجة الحرارة وسرعة التسخين لعينات من الزركونيا ملبدة بموجات الميكرو



الشكل II-22 سرعات التسخين بدلالة درجات الحرارة

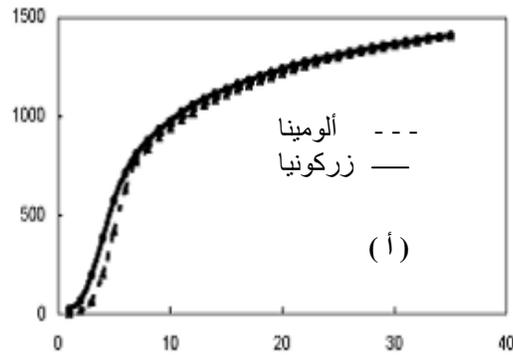
أظهرت النتائج، أن التشغيل باستطاعة قصوى، توصل إلى سرعة تسخين 190 م° / دقيقة وهذا بدون أن تؤدي إلى علامة أو إشارة لصدمة حرارية ، وهذا ما يشير أن العينات قد تم تسخينها حجميا ( تسخين ذاتي ) وليس بالإشعاع الآتي من السيبيتور ، ولكن للتسخين الابتدائي، وجد أنه يجب أن يكون منسجم بتساوي للوقاية من الصدمة الحرارية تحت سرعة التسخين العالية نسبيا ، حيث قام الفريق بوضع سيبيتور واحد على جهة واحدة للعينات ، فوجدوا أن العينات تنكسر عند سرعات التسخين العالية ، وقد فسر الفريق ذلك بأنه نتيجة الناقلية الحرارية الضعيفة للزركونيا، والإشعاع الابتدائي للتسخين الآتي من السيبيتور، من جهة واحدة ، خالفا تزاوج غير متساوي داخل العينة مع موجات الميكرو ، في حين أن التشغيل باستطاعة على خطوات أثبت أن احتمال حدوث صدمة حرارية في العينة ضعيف، عند استعمال سيبيتور في جهة واحدة للعينة.

سرعة التسخين  
دم / دقيقة



الزمن / دقيقة

درجة الحرارة / دم

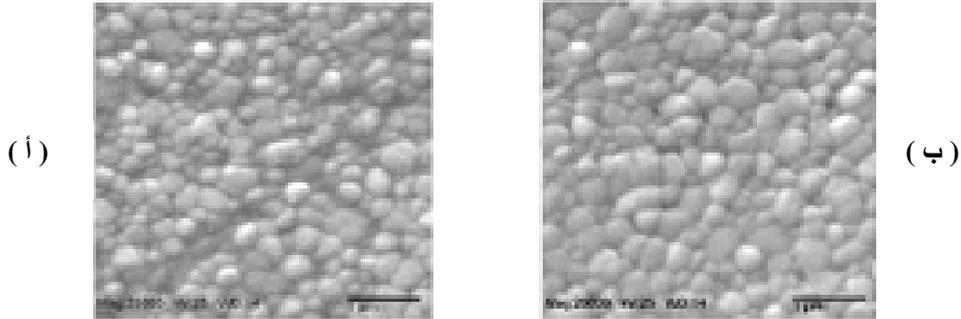


الزمن / دقيقة

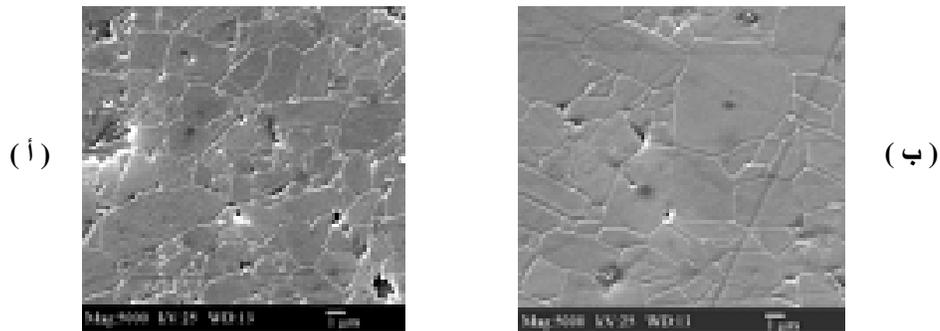
الشكل II-23 تغيرات ( أ ) درجة الحرارة ( ب ) سرعة التسخين ، للألومينا والزركونيا معالجة باستطاعة

مستمرة

الشكل II-23 يظهر أن سرعة التسخين، ودرجة الحرارة النهائية للزركونيا والألومينا المعالجة بموجات الميكرو، باستطاعة مستمرة كانت متشابهة في نهاية المعالجة، على الرغم من اختلاف الخواص العزلية والحرارية لكل واحد منها . وحسب الفريق فالفروقات تنقص من أجل درجات الحرارة العالية. لقد وجد الفريق أن الزركونيا التي تم تليدها بموجات الميكرو أظهرت حبيبات ذات حجم رفيع أكثر منها بالنسبة للتي تمت تليدها في فرن تقليدي ، لكن هذا يدخل ضمن مجال التغيرات، وليس بالفرق الهام حسب الفريق . كذلك فإن الألومينا التي تم تليدها بموجات الميكرو، أظهرت حبيبات أرفع من الملبدة في فرن تقليدي وبشكل واضح. لكن الفريق إعتبر أن القيام بمقارنة مباشرة ودقيقة يتطلب دقة أكبر في قياس درجة الحرارة.



الشكل II-24 البنية الدقيقة للألومينا ( أ ) معالجة بموجات الميكرو ، ( ب ) معالجة تقليدية



الشكل II-25 البنية الدقيقة للزركونيا ( أ ) معالجة بموجات الميكرو ، ( ب ) معالجة تقليدية

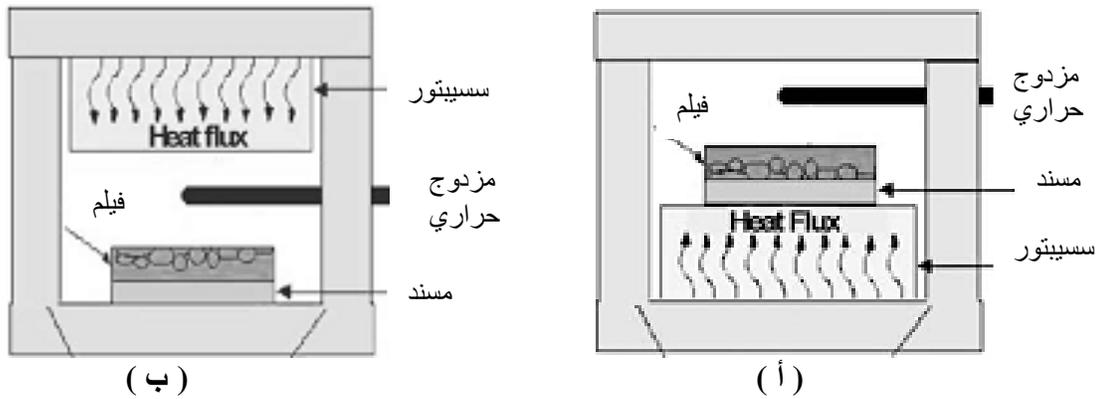
## II- 4.2 عمل فازكونسيلوس وفريقه [53]

## II-1.4.2 العمل المنجز

قام فازكونسيلوس وفريقه، عام 2003 ، ببلورة شرائح رقيقة، من  $(\text{SrBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9)$  SBN باستعمال موجات الميكرو

## II-2.4.2 العمل التجريبي المتبع

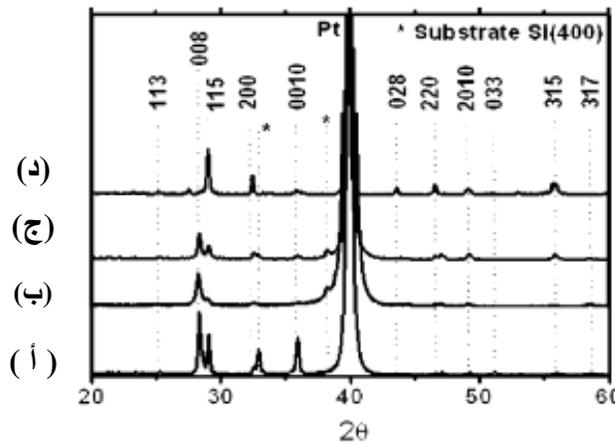
قام الفريق بتحضير شرائح رقيقة من SBN، الفيرو كهربائية وهذا بترسيبها بطريقة الطلاء Spin coating على مساند  $\text{Pt/Ti/SiO}_2/\text{Si}$  10 مم X 10 مم . لقد تم تحضير محلول الطلاء بطريقة Polymeric Precursor ، لقد تم ترسيب الشرائح، بطريقة الطلاء بسرعة دورانية ذات 523 راديان / ثانية لمدة 30 ثانية، ثم قاموا بمعالجة حرارية للشرائح، عند الدرجة 400 م° لمدة ساعتين، داخل فرن تقليدي للتخلص من المواد العضوية . سمك الشرائح المرغوب فيه تم الحصول عليه، بتسريبات متعاقبة متبوعة بمعالجة ابتدائية. لقد قام الفريق بتحسين تبلور الشرائح، بمعالجتها باستعمال فرن موجات الميكرو يعمل بتردد 2.45 جيجاهيرتز وقدرة 900 واط وهذا بعد ترسيب كل الطبقات. عنصر تسخين ( سسيبتور ) من كربيد السليكون (SiC) ذو قطر 40 ملليمتر وسمك 10 ملليمتر تم استعماله لامتصاص موجات الميكرو، ونقل الحرارة إلى الفيلم ، حيث أن حجم الفيلم والمسند، غير كافيان للتزاوج مع موجات الميكرو بشكل فعال. شرائح الـ SBN، تمت بلورتها تحت درجة حرارة 700 م° لمدة 10 دقائق و مع سسيبتور موضوع تحت المسند، ولمدة 10 و 30 دقيقة والسسيبتور موضوع فوق الفيلم ( الشكل II- 26 ) ، وللمقارنة قام الفريق ببلورة شرائح SBN، تحت درجة حرارة 700 م° لمدة ساعتين داخل فرن تقليدي. لقد قام الفريق، بدراسة الشرائح الناتجة باستعمال أشعة X ، وملاحظة البنية الدقيقة للشرائح باستعمال AFM ، كما قاموا بقياس الخواص العزلية وحلقات إستريزيس ( Hysterisis loops ) للشرائح الناتجة.



الشكل II-26 هيكل المنظومة المستعملة في بلورة الشرائح ( أ ) سسيبتور تحت المسند ، ( ب ) سسيبتور موضوع فوق الشرائح

## II-3.4.2 أهم النتائج المتحصل عليها

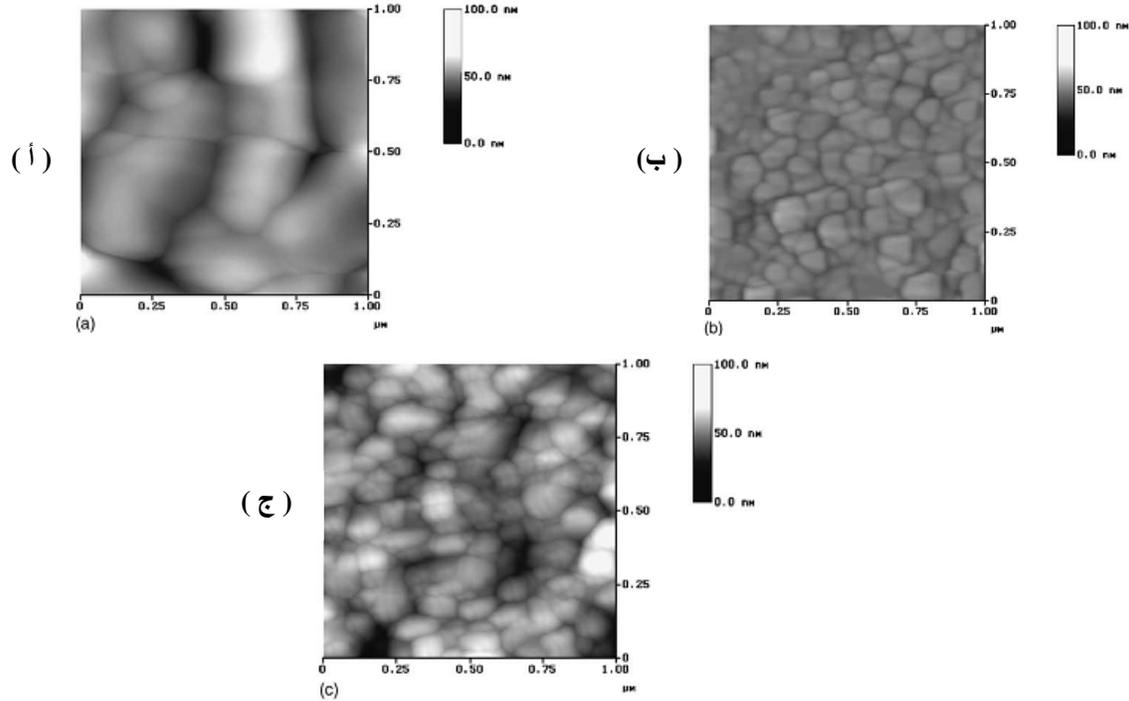
لقد وجد الفريق، أن الشرائح المعالجة باستعمال فرن موجات الميكرو عند 700 م° لمدة 10 دقائق مع سسبيكتور موضوع تحت المسند ، تدفق الحرارة يكون نحو الأعلى ، ويظهر طيف إنعراج الأشعة السينية لها خطوط شديدة توافق المستويات (008) و(0010) ، تشير لأفضلية التوجه في الاتجاه c ، كما لم تظهر خطوط ذات شدة معتبرة موافقة إلى طور ثانوي. أما الشرائح المعالجة باستعمال سسبيكتور يوضع فوق الشرائح ( شكل-II-27 (ب) و(ج) ) فإن تدفق الحرارة يكون نحو الأسفل، والشرائح أظهرت نمو متعدد البلورات، مشابه للشرائح المتحصل عليها بالمعالجة داخل فرن تقليدي (شكل-II-27 (د) ) . غير أن الشرائح المعالجة لمدة 10 دقائق لم يحدث تبلور كامل لطور البيروفسكايت (Perovskite) والسبب حسب الفريق هو أن 10 دقائق هو زمن قصير لتبلور كامل للطور البيروفسكايت ، من جهة أخرى وجد الفريق أن طور البيروفسكايت تم الحصول عليه لما شرائح SBN تم معالجتها حراريا لمدة 30 دقيقة باستعمال سسبيكتور موضوع فوق الشرائح .



**الشكل II-27** طيف إنعراج الأشعة السينية لشرائح SBN ، معالجة بموجات الميكرو عند 700 م° ( أ )  
سسبيكتور موضوع تحت المسند لمدة 10 دقائق ، سسبيكتور موضوع فوق الشرائح ( ب ) لمدة 10 دقائق  
( ج ) لمدة 30 دقيقة ( د ) معالجة تقليدية

لقد أظهرت صور AFM أن الشرائح المعالجة بسسبيكتور موضوع تحت المسند أن الشرائح لها حبيبات شبه مستوية ذات حجم بحوالي 250 نانومتر كما لاحظوا حبيبات قياسية ( typical ) متوجهة في الاتجاه c. أما الشرائح المبلورة بأزمنة مختلفة ( 10 و30 دقيقة ) باستعمال سسبيكتور موضوع فوق الشرائح مباشرة (شكل-II-28 (ب) و(ج) ) على التوالي ، فأظهرت بنية دقيقة مشابهة للبنية الدقيقة للشرائح المعالجة في فرن

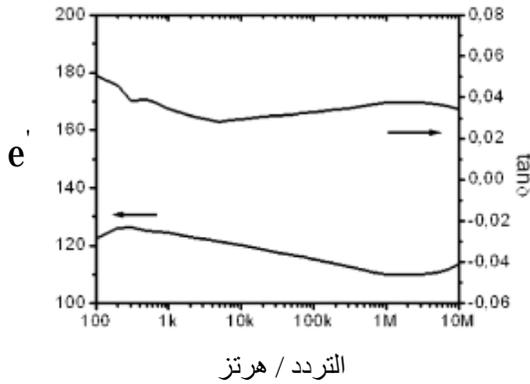
تقليدي [54]، لكن الشرائح المعالجة لمدة 10 دقائق باستعمال سسبيكتور موضوع فوق الشريحة، أظهرت حجم حبيبي أقل منه في الشرائح المحصل عليها بالمعالجة التقليدية ، ربما يعود هذا حسب الفريق إلى الزمن القصير للمعالجة و أيضا لـ Surface nucleation .



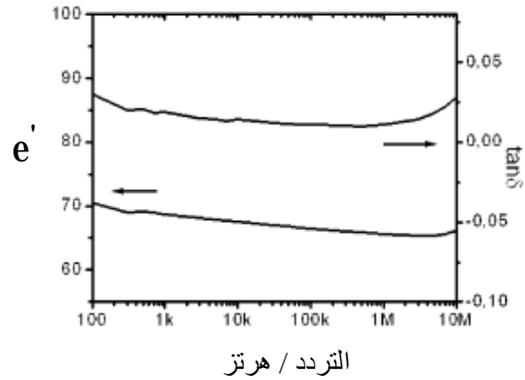
الشكل II-28 صور AFM لشرائح SBN معالجة بموجات الميكرو ( أ ) سسبيكتور موضوع تحت المسند لمدة 10 دقائق ، سسبيكتور موضوع فوق الشرائح ( ب ) لمدة 10 دقائق ( ج ) لمدة 30 دقيقة

لقد وجد الفريق أن الشرائح المعالجة بسسبيكتور موضوع تحت المسند، لها ثابت عزل يقدر بـ 67 ومعامل تبدد بحوالي 0.011 وهذا تحت تردد 100 KHz وكان  $2P_r$  و  $E_c$  بحوالي  $4.2 \mu C/cm^2$  و  $27.5 kV/cm$  على التوالي، وهي قيم ضعيفة نسبيا حسب الفريق، وقد فسروا ذلك بأنه قد يكون راجع إلى التوجه المفضل نحو الاتجاه c، وهذا ما تم التأكد منه من طرف كاتو وفريقه [55]. أما الشرائح المعالجة بسسبيكتور موضوع فوق الشرائح ولمدة 30 دقيقة، فكان لها ثابت عزل يقدر بـ 115 ومعامل تبدد كان بحوالي 0.033 وهذا تحت تردد قدره 100 KHz وعند درجة حرارة الغرفة ، الارتفاع في ثابت العزل عند المعالجة لمدة 30 دقيقة ، يمكن أن يعود حسب الفريق إلى الاستقطاب العازلي، الراجع إلى وجود طور بيروفسكايت ( Perovskite ) ، وكان الاستقطاب  $(2P_r)$  و الحقل الكهربائي  $E_c$  للشرائح المعالجة لمدة 30 دقيقة مع سسبيكتور موضوع فوق الشرائح هي  $10.8 \mu C/cm^2$  و  $170 kV/cm$  على الترتيب ، وهي نتائج تكافئ النتائج المتحصل عليها من طرف زناتي وفريقه [56] للشرائح المحضرة في فرن تقليدي.

أهم ما يمكن استنتاجه حسب الفريق، عن تقنية بلورة شرائح SBN بموجات الميكرو، هو سهولة وتعدد استعمال التقنية ، سامحة لهيكل الشرائح، أن ينتظم بحسب شروط المعالجة الحرارية في فرن موجات الميكرو . وكذلك يمكن الحصول على شرائح كثيفة ومتجانسة وبخواص عزلية جيدة، وباستثمار زمن قصير للمعالجة.

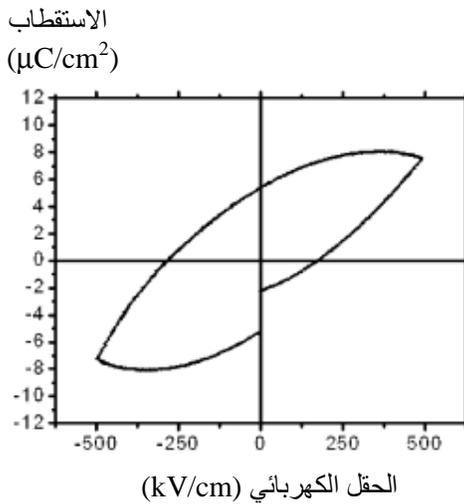


(ب)

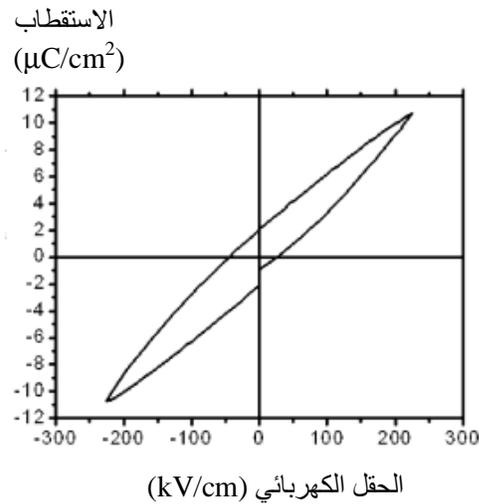


(أ)

**الشكل II-29** ثابت العزل وزاوية فقدان العزلية بدلالة التردد لشرائح SBN معالجة بموجات الميكرو (أ) سسبيكتور موضوع تحت المسند لمدة 10 دقائق ، (ب) سسبيكتور موضوع فوق الشرائح لمدة 30 دقيقة



(ب)



(أ)

**الشكل II-30** تغيرات الاستقطاب مع الحقل الكهربائي لشرائح SBN معالجة بموجات الميكرو (أ) سسبيكتور موضوع تحت المسند لمدة 10 دقائق ، (ب) سسبيكتور موضوع فوق الشرائح لمدة 30 دقيقة

**الفصل الثالث : الطرق التجريبية المتبعة والأجهزة المستعملة****مقدمة**

يشتمل هذا الفصل ،على طريقة تصميم منظومة التسخين المستعملة في الدراسة، بدءا من التعديلات المدخلة على فرن موجات الميكرو، وطريقة صناعة وتركيب المزدوج الحراري، وحامله المعدني إلى طريقة تحضير وتشكيل عناصر التسخين (السببوتور)، المستعملة في دراسة التسخين بموجات الميكرو، وهذا باستخدام الجملة سببوتور – عازل حراري. مع تقديم شرح مفصل لطرق التركيب والتصميم، وذكر المشاكل المواجهة وحلولها إن وجدت. كما يتطرق هذا الفصل، إلى الطرق التجريبية المتبعة في تحضير العينات، وأهم الأجهزة المستخدمة في عملية التحضير والتحليل.

**1-III فرن موجات الميكرو**

أجريت كل اختبارات التسخين، باستعمال فرن موجات ميكرو نموذج LG MD 2642 GTW (الشكل 1-III). ذو حجرة متعددة الأنماط، أبعادها 500×310×500 ملليمتر(عمق×ارتفاع×عرض). يشتغل بتردد 2.45 جيغا هرتز،و باستطاعة خروج قصوى تقدر ب 900 واط.يسمح ببرمجة لزمان التسخين كما يسمح ببرمجة أربع مستويات مختلفة لاستطاعة خروج موجات الميكرو، بالنسب 80% و60% و40% و20% من الاستطاعة القصوى (100% = 900 واط). يتم مراقبة زمن التسخين عبر شاشة رقمية. الجهاز مزود بنظام إغلاق للحماية ، من تسرب موجات الميكرو، يسمح بقطع التغذية الكهربائية عن المغنطرون (منبع الموجات) عند فتح باب الفرن مباشرة.



الشكل 1-III فرن موجات الميكرو المستعمل في الدراسة

**III-2 التعديلات المدخلة على فرن موجات الميكرو****III-2.1 انتزاع الطبق الدوار ومحركه الكهربائي**

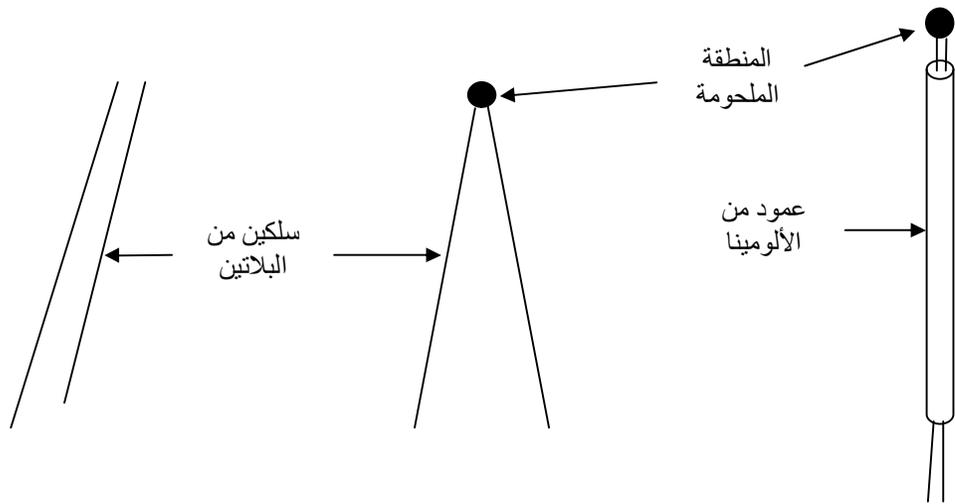
إن عملية إدخال مزدوج حراري، من أجل قياس درجة الحرارة ، داخل فرن موجات الميكرو يتطلب إحداث ثقب على مستوى الجدار العلوي أو السفلي لحجرة التسخين متعددة الأنماط. وقد قمنا بإحداث ثقب في الجدار العلوي للحجرة وفي هيكل الفرن من أجل إدخال مزدوج حراري متحرك من الأعلى يسهل تثبيته وضبطه عند الارتفاع المرغوب فيه في أي وقت كما يمكن انتزاعه، وإعادته إلى موضعه، بشكل متكرر متى تطلب الأمر إلى ذلك. أما بالنسبة للجدار السفلي للحجرة، فهو أصلاً يحوي على ثقب يناسب جيداً هذا العمل. كان هذا الثقب يسمح بوصول الطبق الدوار بمحركه الكهربائي المثبت من الجهة الخارجية لجدار الحجرة السفلي، حيث قمنا بنزع الطبق والمحرك من أجل استغلال الثقب والذي هو بقطر 1.6 سنتيمتر لإدخال المزدوج الحراري، من الأسفل وتتمثل أفضلية إدخال المزدوج الحراري من الأسفل هو أنه يكون ممدوداً إلى الأعلى لمسافة أقصر، مما يقلل من السطح الظاهري الذي تتفاعل معه موجات الميكرو، وبالتالي جعل الاضطراب المحدث في الحقل الكهرومغناطيسي أقل ما يمكن، على عكس إدخاله من الجهة العلوية، أين يكون المزدوج الحراري ممدوداً إلى الأسفل لمسافة أطول. ميزة أخرى لإدخال المزدوج الحراري من الأسفل، تكمن في عدم الحاجة إلى نزع عمود المزدوج الحراري، للسماح برفع أو وضع عناصر التسخين التي يتم اختبارها، لأنه يكفي رفعها قليلاً ثم سحبها إلى الخارج. لكن احتجنا في بعض الأحيان لاستعمال المزدوج الحراري من الأسفل و من الأعلى في نفس الوقت ( الشكل III - 15).

**III-2.2 تثبيت حامل المزدوج الحراري**

لكي يكون المزدوج الحراري عملي، يجب أن يكون على ارتفاع من سطح جدار الحجرة السفلي وأن يكون كذلك ماراً بالمحور الشاقولي لمركز الحجرة بالضبط، في آن واحد. فالشرط الأول يسمح بقياس درجة حرارة المنطقة الأكثر سخونة ، لعنصر التسخين، أو بالأحرى لمنظومة التسخين (سسبتور /عازل حراري)، والتي تكون عادة في مركز عنصر التسخين. والشرط الثاني يسمح للمزدوج الحراري أن لا يميل أو أن ينحرف باتجاه أحد الجدران الداخلية للسيسبتور وبالتالي زيادة احتمال حدوث تفريغ كهربائي، قد يكون من الشدة ما يتلف رأس المزدوج الحراري، وغطاء الحماية البلاستيكي. أما بالنسبة للمزدوج الحراري الموضوع عبر الجدار العلوي للفرن، فدور الحامل يقتصر على التثبيت وتعديل ارتفاع المزدوج الحراري الذي هو في هذه الحالة تجاري من النوع Cr/AI له غمد للحماية من نفس المعدن، ويستطيع قياس درجة الحرارة إلى حوالي 1350<sup>0</sup> م . في حين أن المزدوج الحراري الموضوع من الأسفل، صنع وركب هو وأجزائه كلية في المختبر.

**III-3 صناعة المزدوج الحراري**

تمت صناعة المزدوج الحراري في المختبر وهو من النوع Pt-Pt 10Rh ، حيث تم لحام سلكين من البلاتين بواسطة جهاز القوس الكهربائي، بهدف إنشاء وصلة PN في المنطقة الملحومة (الذائبة)، عند رأس المزدوج ( الشكل III-2) ، تملك هذه الوصلة حاجز كمون تتغير قيمته بتغير درجة حرارة المنطقة الملحومة، من درجة حرارة الغرفة إلى حوالي  $1650^{\circ}$  م. كل قيمة لحاجز الكمون، توافق درجة حرارة معينة. يتم بعد ذلك تمرير طرفي السلكين الحرين ، عبر عمود من الألومينا يحوي تجويفين يمنعان تماس السلكين. يعطي عمود الألومينا دعامة قوية نسبيا للمزدوج الحراري ويجعله ممدودا بشكل مستقيم تماما. كما تم تزويد المزدوج الحراري بحامل معدني وحماية بلاطينية.



الشكل III-2 أهم مراحل صناعة المزدوج الحراري

**III-4 صناعة وتركيب حامل المزدوج الحراري وحمايته البلاطينية**

تم صناعة حامل المزدوج الحراري، وحمايته البلاطينية بطريقتين . الطريقة الأولى أظهرت بعض النقص والتي تم تجاوزها في الطريقة الثانية بشكل نهائي.

**III-1.4 الطريقة الأولى**

تم صناعة حامل معدني للمزدوج الحراري في المختبر والذي يتكون أساسا من أربعة أقسام (الشكل III-3)

- برغي معدني ذو قاعدة مفلطحة دائرية.

- قرص معدني من الفولاذ.

- سلك حلزوني من البلاتين

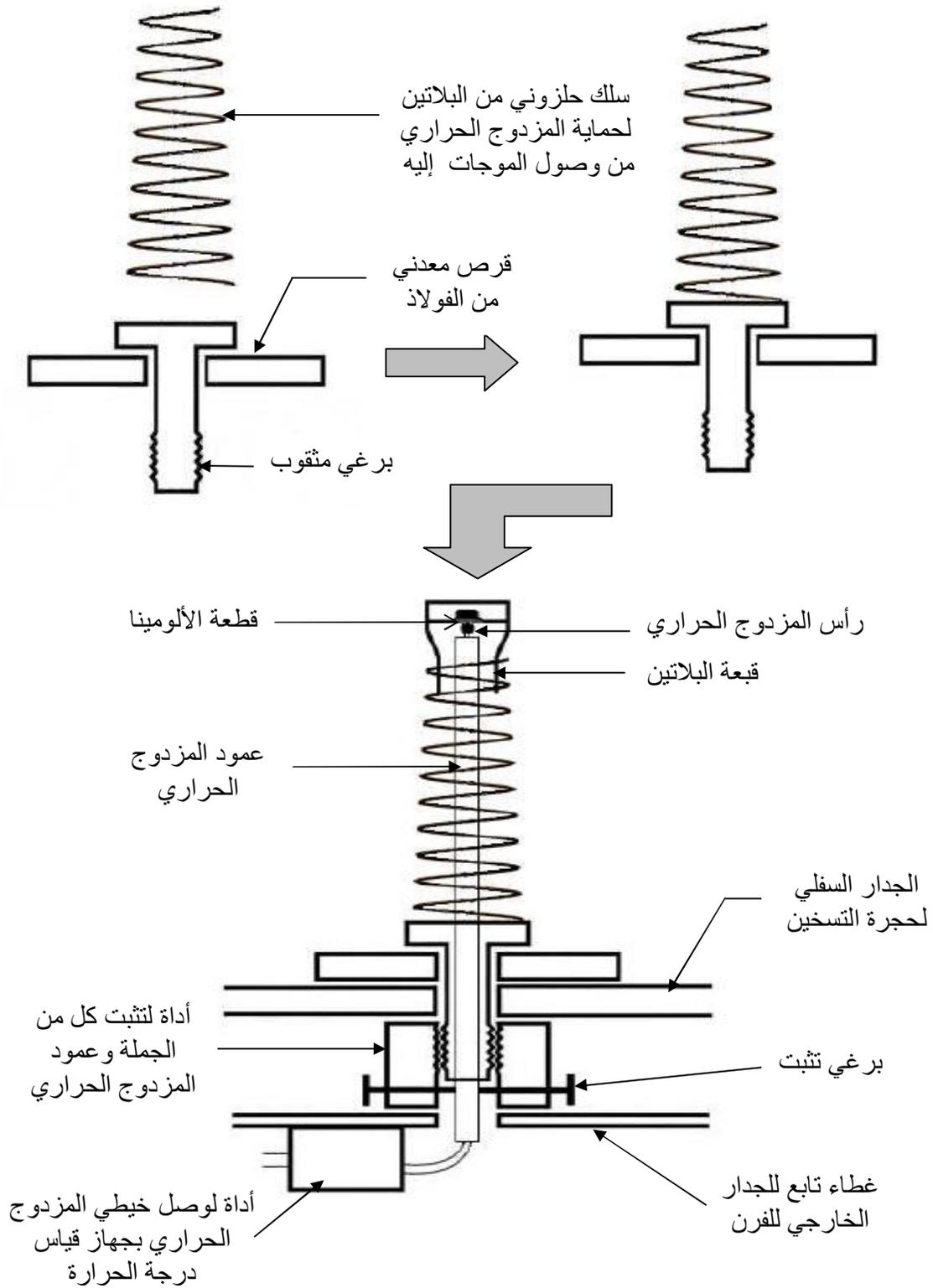
- قطعة معدنية تلعب دور صمولة للبرغي وأداة للتثبيت عمود المزدوج الحراري .  
قمنا بثقب البرغي عبر المحور، وقمنا بتمريره عبر ثقب القرص المعدني الذي أحدثناه إلى الثقب المركزي الذي كان يعبره محور دوران محرك الطبقة الدوار قبل انتزاعه، قام القرص المعدني بدور قاعدة ارتكاز للجملة، وبدور حاجز فوق الثقب المركزي، يمنع تسرب موجات الميكرو، و قام سلك البلاتين الحلزوني بدور غطاء (غلاف) يحمي المزدوج الحراري من موجات الميكرو أن تصل إليه، حيث أن الأبعاد بين حلقات السلك البلاتيني صغيرة، لا تسمح لموجات الميكرو باختراقها. فهي تعمل كشبكة تمنع عبور موجات الميكرو من خلالها، كما هو الشأن بالنسبة للشبكة المعدنية المتواجدة على مستوى باب حجرة الفرن. ويتصل السلك البلاتيني في نهايته العلوية بقبعة بلاتينية، تعمل كحماية لرأس المزدوج الحراري، ولتجنب رأس المزدوج الحراري من ملامسة القبعة من الداخل تم تثبيت قطعة صغيرة من الألومينا المسامي في وسط القبعة، تقوم قطعة الألومينا مقام مانع يمنع نقل تأثير موجات الميكرو من القبعة إلى رأس المزدوج الحراري . نشير أن قبعة المزدوج الحراري وضعت لتلعب دورين مهمين الأول منع وصول موجات الميكرو إلى المزدوج الحراري، والثاني كحامل للعينات المراد دراستها في المستقبل. أما بالنسبة للنهاية السفلية للسلك فتم تثبيتها أسفل قاعدة البرغي الدائرية (إطباق القاعدة على السلك). لتثبيت الجملة في الجدار السفلي للفرن، تم صناعة قطعة معدنية لها، ثقب به أخاديد في الجهة العلوية لتثبت في البرغي أي تلعب دور الصامولة للبرغي وهذا لتثبيت الجملة ككل في الجدار السفلي للفرن، و لها في الجهة السفلية منها ، أداة لتثبيت المزدوج الحراري عند الارتفاع المطلوب، تتمثل في برغيين متقابلين يتم شدهما معا ، وهذا حتى لا ينكسر عمود المزدوج الحراري.

### III-1.1.4 نقائص الطريقة الأولى

أظهرت هذه الطريقة بعض النقائص، حيث عانت من مشكلين أساسيين، يتمثل الأول أنه في بعض الأحيان خاصة عند لمس أو تحريك حلقات السلك الحلزوني، أو وضع أثقال فوق القبعة البلاتينية (عينات)، يحدث اضطراب في قياس درجة الحرارة، وصعوبة في قراءتها من على شاشة مقياس درجة الحرارة. حيث تأخذ درجة الحرارة في التذبذب صعودا ونزولا، وتستمر على هذا النحو إلى حدود الدرجة 1100<sup>0</sup> م، حيث يزول الاضطراب وتعود درجة الحرارة إلى الارتفاع بشكل عادي. أما المشكل الثاني، فيتمثل في أنه عند استعمال المزدوج الحراري السفلي والعلوي في نفس الوقت، يتلف المزدوج الحراري السفلي الذي صنعناه، على مستوى الجهة العلوية منه، أسفل المنطقة الملحومة (الرأس) مباشرة. تطلب منا ذلك، إعادة نزعه وتصليحه وهي عملية صعبة وتتطلب مهارة ودقة. لكن تلف من جديد، بمجرد وضع المزدوج الحراري العلوي. وفي مرات أخرى، تلف كذلك السلك البلاتيني الحلزوني، بمجرد وضع المزدوج الحراري العلوي في المنطقة العلوية منه.

**III-1.1.1.4 أسباب اضطراب قياس درجة الحرارة وتلف المزدوج الحراري**

يعود سبب اضطراب وتذبذب درجة الحرارة المقاسة بالمزدوج الحراري، مع صعوبة قراءتها من على شاشة مقياس درجة الحرارة، إلى وصول موجات الميكرو إلى المزدوج الحراري، وتداخلها مع القوة المحركة الكهربائية المولدة فيه. وهذا يحدث عبر حلقات السلك الحلزوني، التي اتسعت بفعل اللمس والتحرك لهذا الأخير، أما توقف اضطراب درجة الحرارة بعد تجاوز حدود الدرجة 1100 °م فيعود إلى أن عنصر التسخين (السببوتور) في المنظومة عند هذه الدرجة يمتص جل طاقة موجات الميكرو ولا يبقى منها ما يصل إلى المزدوج الحراري بشدة كافية للتأثير في قوته المحركة ( حاجز الكمون)، وخلق اضطراب في درجة الحرارة المقاسة. أما سبب تلف المزدوج الحراري عند وضع المزدوج الحراري العلوي، فيعود إلى أن هذا الأخير عند وضعه يكون ممدودا إلى الأسفل لمسافة طويلة، وهذا ما يخلق اضطراب في الحقل الكهرومغناطيسي حيث تكون شدة الحقل كبيرة أسفل رأسه المحدب، أي فوق المزدوج الحراري السفلي مباشرة، ونتيجة أن رأس المزدوج الحراري السفلي، حمايته تتمثل في قبعة من البلاتين، متصلة بسلك البلاتين الحلزوني الموصول هو بدوره بالجدار السفلي للحجرة، عن طريق البرغي. أي أن السلك الحلزوني مثاله في ذلك مثال الهوائي الموصول بالأرض، الذي يتخلص من التيارات المحدثة على سطح القبعة، وعلى سطحه والنتيجة بفعل تفاعل حقل موجات الميكرو، الكهرومغناطيسي مع الإلكترونات الحرة لهما وذلك بتمريرها إلى الأرض. و نتيجة أن شدة الحقل الكهربائي كبيرة، فإن السلك الحلزوني لا يستطيع التخلص من جميع التيارات الحاصلة، وهذا ما يؤدي إلى انتقال تيارات شديدة ما بين القبعة البلاتينية ورأس المزدوج الحراري المحدب، والتي من الشدة ما تؤدي إلى ذوبان الأسلاك البلاتينية المشكلة للمزدوج الحراري، دون إغفال الدور المساعد، الذي تلعبه درجة الحرارة المرتفعة الناتجة عن عنصر التسخين، والتي ترفع من درجة حرارة الأسلاك البلاتينية للمزدوج الحراري وكذلك من درجة تأكسد سطح السلك الحلزوني مما ينقص من التماس الموجود بين هذا الأخير والقبعة البلاتينية من جهة، وبينه وبين البرغي المتصل بالجدار السفلي للحجرة من جهة أخرى. على الرغم من أن هذه الطريقة كانت ناجحة في حالة عدم وضع المزدوج الحراري العلوي، وباستعمال سلك حلزوني ذو حلقات قريبة جدا، إلا أننا ارتأينا وضع طريقة أخرى، تكون عملية أكثر، وتجعلنا نعمل براحة أكبر، وتوفر علينا خسارة أسلاك البلاتين الثمينة.

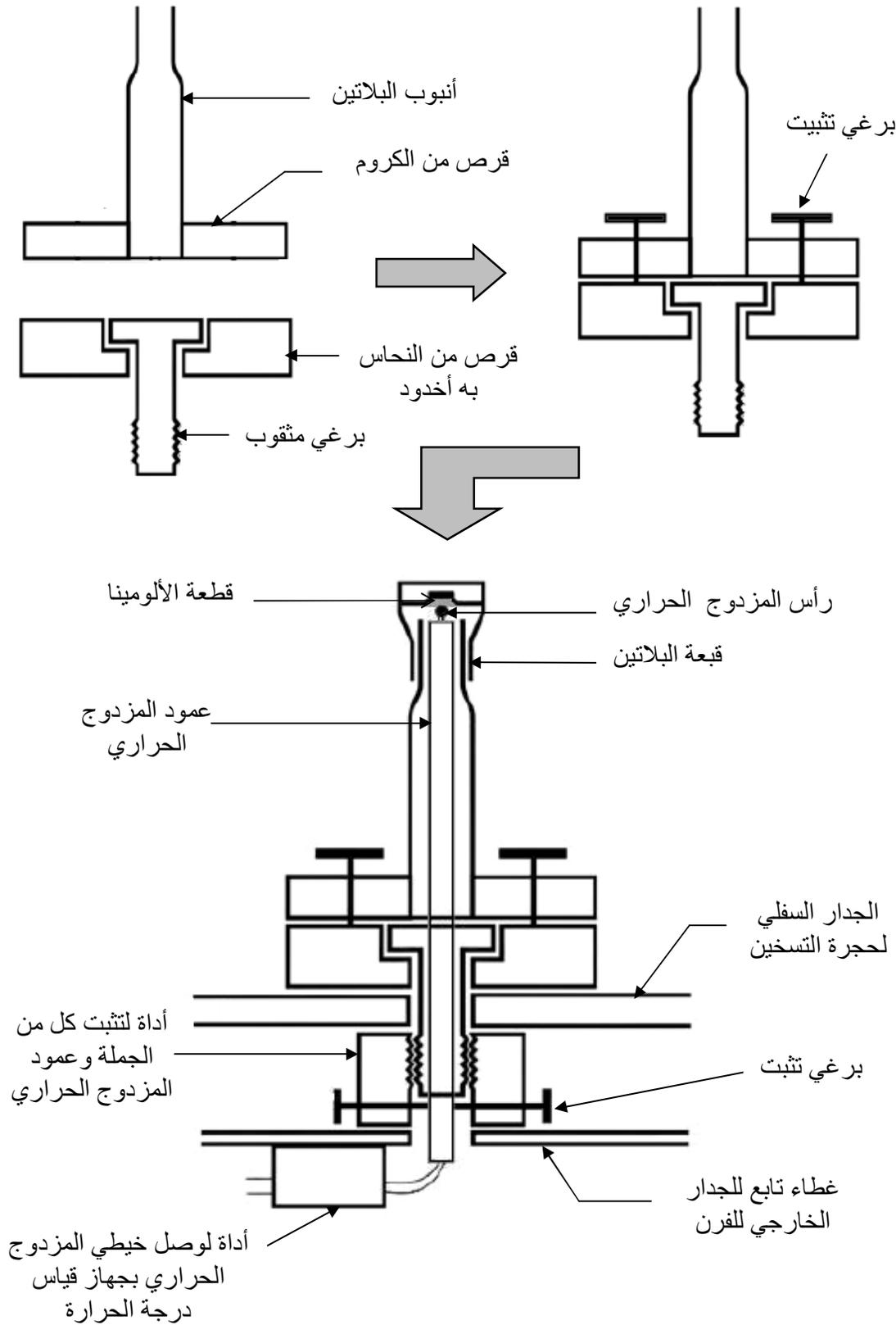


الشكل III-3 الطريقة الأولى لصناعة وتركيب حامل المزدوج الحراري وحمايته البلاتينية

**III-2.4 الطريقة الثانية :**

- تعتمد صناعة وتركيب حامل المزدوج الحراري، وحمائته، في هذه الطريقة (الشكل III-4) على أربع عناصر رئيسية
- قرصان معدنيان الأول من الكروم والثاني من النحاس.
  - أنبوب من البلاتين هو في الأصل مصهر قمنا بثقبه.
  - برغي معدني بقاعدة دائرية مفلطحة.
  - قطعة معدنية مثقوبة المحور، تلعب دور صمولة للبرغي (تثبيت الجملة)، وأداة للتثبيت عمود المزدوج الحراري (عمود الألومينا).

قمنا كما هو الحال في الطريقة الأولى، بثقب البرغي عبر المحور وقمنا بتمريره عبر ثقب القرص النحاسي الذي أحدثنا به أخدود، بواسطة آلة للفرز بعمق وقطر القاعدة الدائرية المفلطحة للبرغي ، أما أنبوب البلاتين فقمنا بصناعة قاعدة له، تتمثل في قرص من معدن الكروم . سبب استعمالنا لمعدن الكروم، ناتج أن هذا الأخير درجة تأكسده عالية ، كما أن درجة انصهاره عالية تصل إلى حوالي 1420<sup>0</sup>م .حيث قمنا بإدخال قرص الكروم من الجهة العلوية لأنبوب البلاتين وقمنا بسحبه إلى الأسفل كما يسحب الخاتم في الأصبع حتى يصبح القرص قاعدة للأنبوب البلاتيني، نشير هنا أنه يجب أن يكون هناك تماس جيد(احتكاك) و التصاق بين القرص أي الجدار الداخلي لثقبه و سطح الأنبوب الخارجي وهذا لا يتحقق إلا إذا كان قطر الثقب بنفس القطر الخارجي للأنبوب وهي عملية تتطلب الدقة. نقوم بعد ذلك بإطباق القرصين المعدنيين، (الأول المصنوع من الكروم والمتصل بالأنبوب البلاتيني والثاني النحاسي الذي يحوي أخدود والمشمتمل على البرغي المثقوب)، ثم نقوم بربطهما بإحكام بواسطة برغيين.ثم قمنا بتمرير النهاية الحرة للبرغي ، إلى الثقب الموجود في الجدار السفلي للفرن و الذي كان يعبره محور دوران محرك الطبق الدوار قبل انتزاعه، قام القرص المعدني النحاسي بدور قاعدة ارتكاز للجملة، وبدور حاجز فوق الثقب المركزي، يمنع تسرب موجات الميكرو. لتثبيت الجملة ككل في الجدار السفلي للفرن، تم صناعة قطعة معدنية، كما هو الشأن في الطريقة الأولى لها ثقب به أخاديد في الجهة العلوية، لتثبت في البرغي، أي تلعب دور الصامولة للبرغي وهذا لتثبيت الجملة، ككل في الجدار السفلي للفرن و لها في الجهة السفلية منها أداة لتثبيت المزدوج الحراري عند الارتفاع المطلوب، تتمثل في برغيين متقابلين يتم شد هما معا وهذا حتى لا ينكسر عمود المزدوج الحراري على نفس منوال الطريقة الأولى.



الشكل III- 4 الطريقة الثانية لصناعة وتركيب حامل المزدوج الحراري وحمايته البلاتينية

## III-5 منظومة التسخين بموجات الميكرو

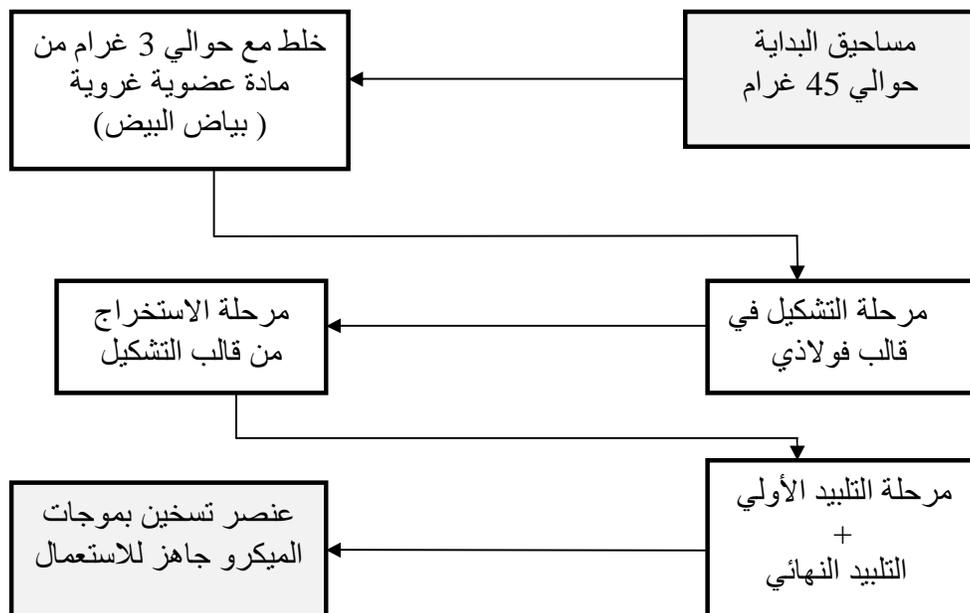
## III-1.5 مكونات منظومة التسخين

تتكون منظومة التسخين المستعملة في هذه الدراسة، من عنصر التسخين الذي يقوم بامتصاص موجات الميكرو، وتحويلها إلى حرارة نتيجة تصادم جزيئاته بعضها ببعض مولدة بذلك حرارة، وهو مصنوع أساسا من مادة كربيد السليكون (SiC) و نظام للعزل الحراري يحفظ الحرارة المولدة من طرف عنصر التسخين من الضياع داخل حجرة التسخين. وهو مصنوع من ألواح الألومينا المسامي، ذات الكثافة المنخفضة.

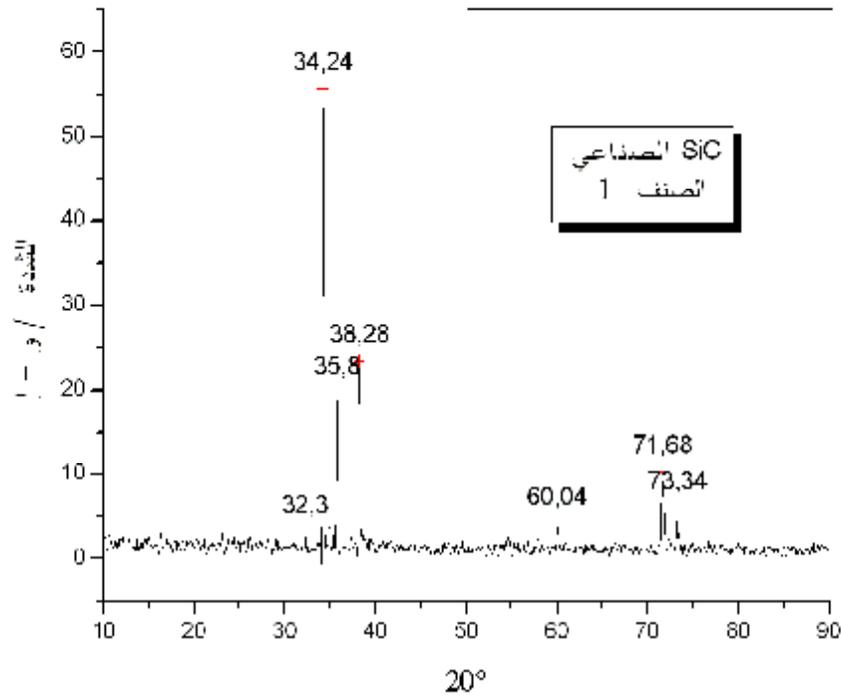
## III-2.5 صناعة منظومة التسخين

## III-1.2.5 صناعة عناصر التسخين

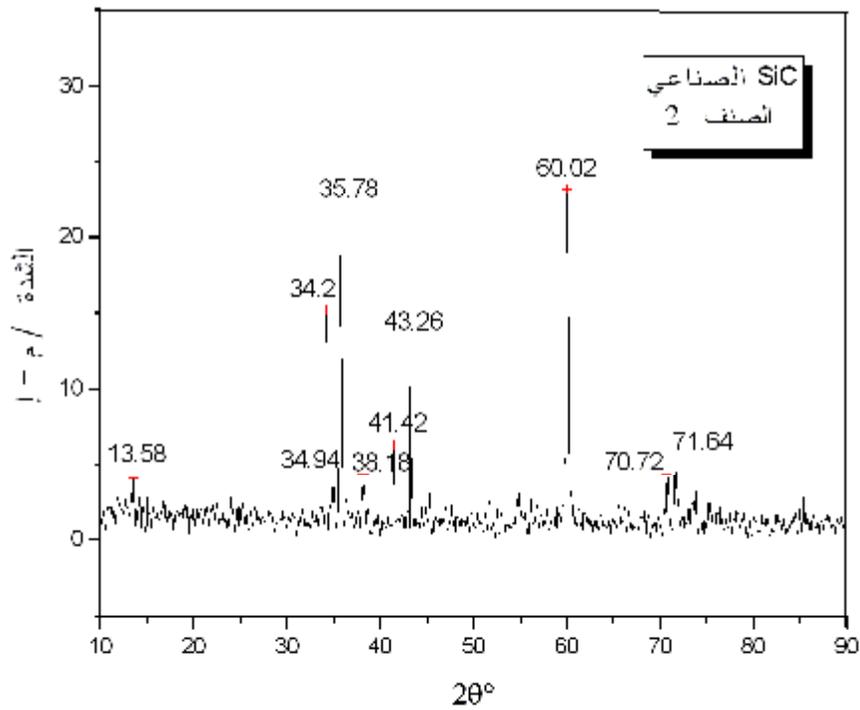
عنصر التسخين بموجات الميكرو، هو عبارة عن قطعة أسطوانية الشكل مصنوعة أساسا من مادة كربيد السليكون الصناعي، تجرى عليها اختبارات التسخين. الهدف من استعمال كربيد السليكون الصناعي بدل كربيد السليكون المخبري النقي، هو وفرته وعدم غلائه من جهة، وكذلك يلبي الغاية المرجوة من الدراسة وذلك عن طريق استعماله لوحده، أو بإضافة عناصر نقية (مخبرية) أخرى لتحسين خصائصه، كأكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ )، ومن تم تحسين درجة تفاعله مع موجات الميكرو، وبذلك فهم أكثر لتفاعلات موجات الميكرو مع المواد وتأثير خصائص هذه الأخيرة في ذلك. نتيجة أنه كان لدينا ثلاث أصناف من كربيد السليكون الصناعي، قمنا باختيار الصنف الأحسن، وذلك بإجراء اختبارات التسخين على كل صنف وتدعيم ذلك بدراسة الخواص العزلية لكل صنف، ومن تم اختيار صنف واحد جيد، لاستعماله في جميع عناصر التسخين لكامل الدراسة بعد ذلك. والمخطط التالي، يوضح أهم المراحل لصناعة عنصر التسخين.



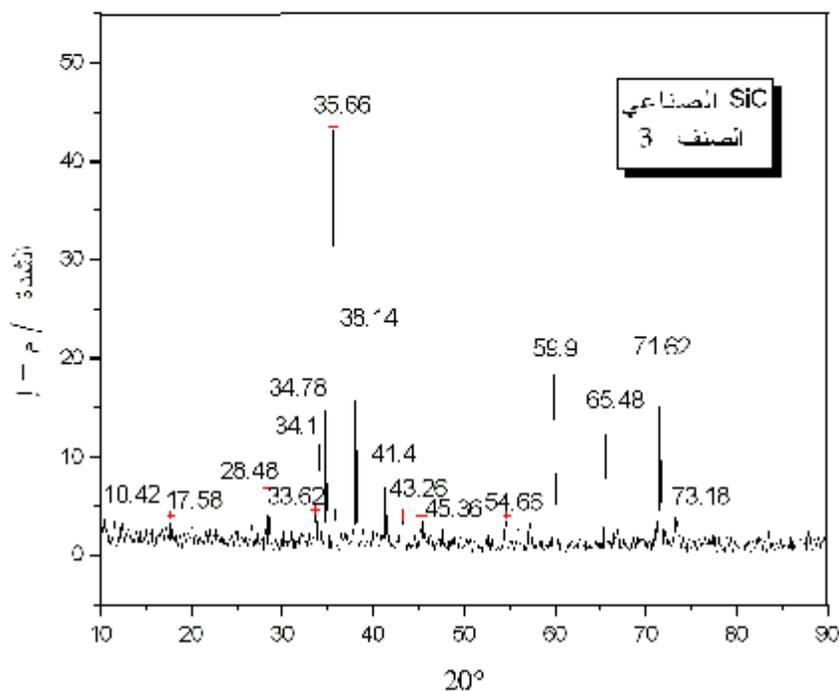
الشكل III-5 طريقة تحضير عناصر التسخين



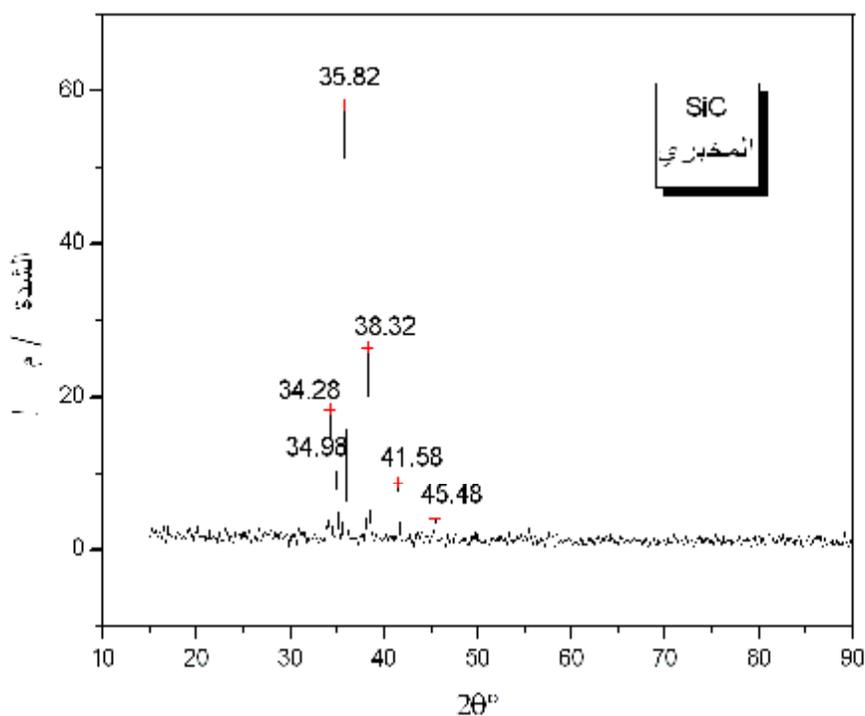
الشكل III-6 طيف انعراج الأشعة السينية لمسحوق كربيد السليكون الصناعي الصف الأول



الشكل III-7 طيف انعراج الأشعة السينية لمسحوق كربيد السليكون الصناعي الصف الثاني

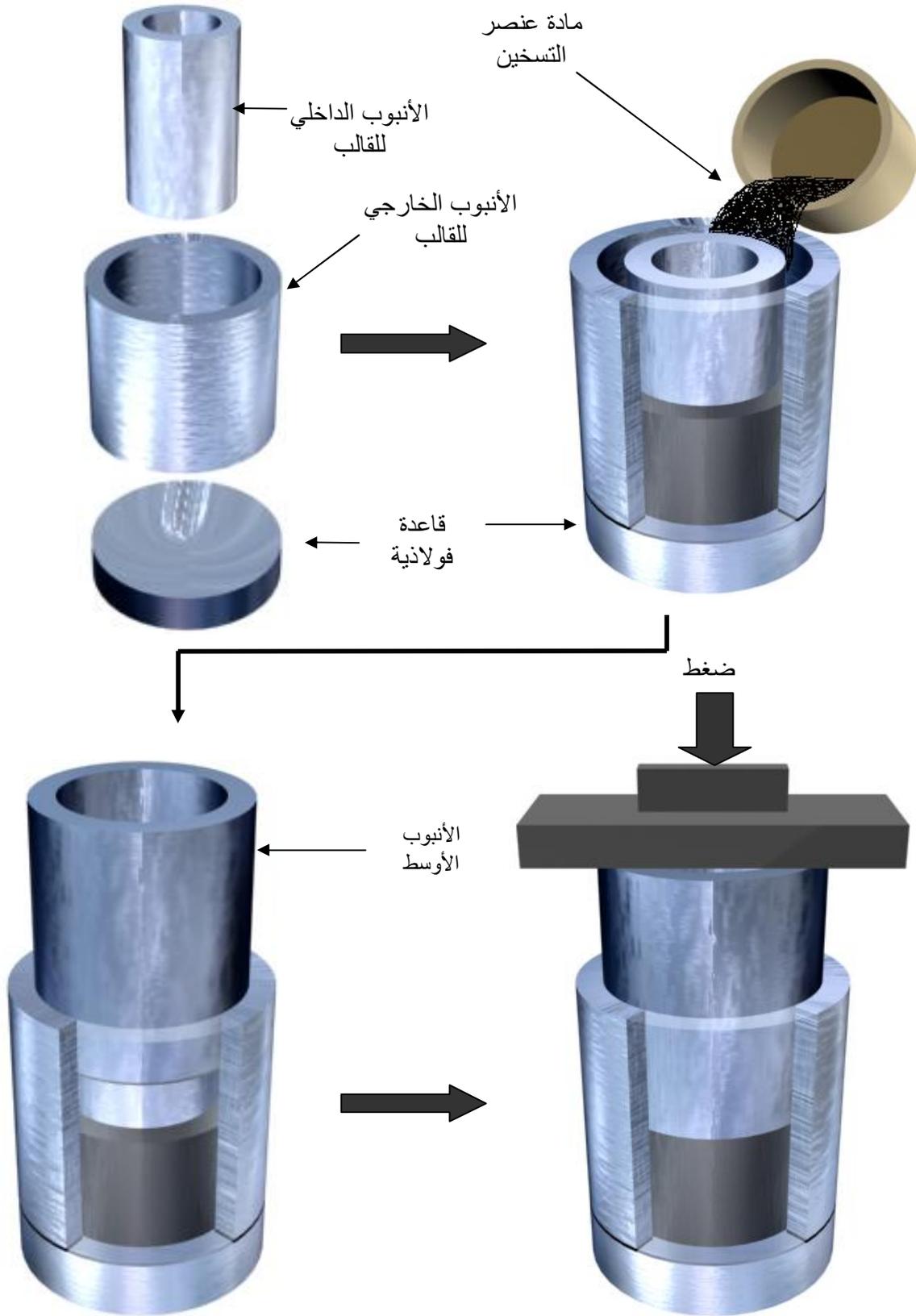


الشكل III- 8 طيف انعراج الأشعة السينية لمسحوق كربيد السليكون الصناعي الصنف الثالث



الشكل III- 9 طيف انعراج الأشعة السينية لمسحوق كربيد السليكون المخبري

لقولية عنصر التسخين، استعملنا قالب يتكون من ثلاث أنابيب اسطوانية من الفولاذ، وقاعدة عبارة عن قرص من الفولاذ كذلك. تألف الثلاث أنابيب الأسطوانية عند تراكبها مع بعض (داخل بعضها البعض)، مصفوفة واحدة. نقوم بتثبيت الأنبوبين الخارجي والذي قطره الداخلي 4.9 سنتيمتر، وقطره الخارجي 6.1 سنتيمتر، والداخلي والذي قطره الداخلي 3.9 سنتيمتر، وقطره الخارجي 2.4 سنتيمتر، فوق القاعدة الفولاذية، بحيث يكون الفضاء الموجود بينهما، ذو أبعاد ثابتة من جميع الجهات وهو بنفس أبعاد الأنبوب الأوسط. تلعب القاعدة الفولاذية دورين أساسيين، الأول كحامل للأنابيب الأسطوانية والثاني أنها تمنع خروج مادة عنصر التسخين، وخاصة أثناء كبسها. نقوم بملء هذا الفضاء الموجود بينهما، بمادة عنصر التسخين. وكما سبق الإشارة إليه، فإن كمية المادة تكون وفق أوزان محددة، ودقيقة للمواد الداخلة في تشكيل عنصر التسخين، حيث أن وزن المسحوق هو 45 غرام مع إضافة حوالي ثلاث غرامات من مادة غروية عضوية (بياض البيض)، من أجل تماسك الخليط. بعد ملء الفضاء الموجود بين الأنبوبين بخليط مادة عنصر التسخين، نقوم بإدخال الأنبوب الأسطواني الأوسط، من الأعلى خلال الفضاء الموجود بين الأنبوبين الداخلي والخارجي، وهذا من أجل كبس الخليط، تحت ضغط 3 طن / م<sup>2</sup> ليصبح عبارة عن قطعة متماسكة (الشكل III-9).



الشكل III - 10 مراحل قولبة و تشكيل عناصر التسخين

لاستخراج قطعة عنصر التسخين، نقوم برفع الجملة، وسحب القاعدة الفولاذية، ثم نقوم بقلب الجملة (ال قالب) عكسياً أي الأسفل إلى الأعلى والأعلى إلى الأسفل. حيث يصبح الأنبوب الأوسط عبارة عن قاعدة ارتكاز للجملة. ولاستخراج القطعة من القالب، نقوم باستعمال أنبوبين أسطوانيين، الأول يوضع فوق الأنبوب الخارجي للقالب مباشرة، حيث قطره الخارجي هو بنفس القطر الخارجي للأنبوب القالب الخارجي، أما قطره الداخلي فهو أصغر من القطر الداخلي للأنبوب الخارجي للقالب. أما الأنبوب الثاني، فيوضع فوق الأنبوب الداخلي، لقالب التشكيل مباشرة، حيث قطره الداخلي هو بنفس القطر الداخلي للأنبوب الداخلي للقالب، في حين أن قطره الخارجي هو أصغر من القطر الخارجي للأنبوب الداخلي للقالب. والهدف من ذلك هو عدم لمس هذين الأنبوبين لجدران قطعة عنصر التسخين، عند استخراجها، حتى لا يحدث لها تشويه أو انهيار، نظراً لهشاشتها الكبيرة. بعد وضع الأنبوبين، كل واحد فوق الأنبوب المقابل له، نقوم بضغط الأنبوبين في آن واحد نحو الأسفل ببطء وحذر شديدين، حتى لا يتحرك الأنبوبين عن موضعهما الأصلي، وبالتالي ملامسة قطعة عنصر التسخين، هذا من جهة، ومن جهة أخرى، حتى لا يحدث تشققات للقطعة، وبالتالي تصبح غير صالحة للدراسة. بعد خروج القطعة من القالب، نقوم برفع أنبوبي الاستخراج بحذر شديد، ثم نقوم بسحب قطعة عنصر التسخين بواسطة حلقة معدنية، يكون قطرها الداخلي بنفس القطر الخارجي للقطعة أو أكثر قليلاً وهذا حتى لا تنهار القطعة في حالة قمنا برفعها بواسطة اليد، نتيجة هشاشتها الكبيرة. ثم وضعها فوق مصهر مسطح من الألومينا، من أجل معالجتها حرارياً في فرن كلاسيكي عند الدرجة 800° م، لمدة 1 ساعة بسرعة تسخين 6° م / دقيقة. ثم نعالجها في فرن موجات الميكرو عند الدرجة 1250° م لمدة دقيقة ثم تجرى عليها إختبارات التسخين بعد ذلك وهذا لجميع العناصر التي تستطيع الوصول إلى هذه الدرجة في فرن موجات الميكرو، أما العناصر المصنوعة من كربيد السليكون الصناعي (الأصناف الثلاثة) فقط فإنه تتم معالجتها حرارياً في فرن كلاسيكي عند الدرجة 1000° م لمدة ساعة بسرعة تسخين 6° م / دقيقة فقط، ثم تجرى عليها إختبارات التسخين بعد ذلك مباشرة. يجب الإشارة أن عناصر التسخين التي لا تستطيع الوصول إلى الدرجة 1250° م في فرن موجات الميكرو، فإنه يتم معالجتها حرارياً في فرن كلاسيكي عند الدرجة 800° م، لمدة 1 ساعة، بسرعة تسخين 6° م / دقيقة، ثم تجرى عليها إختبارات التسخين بعد ذلك مباشرة (الجدول IV-1).

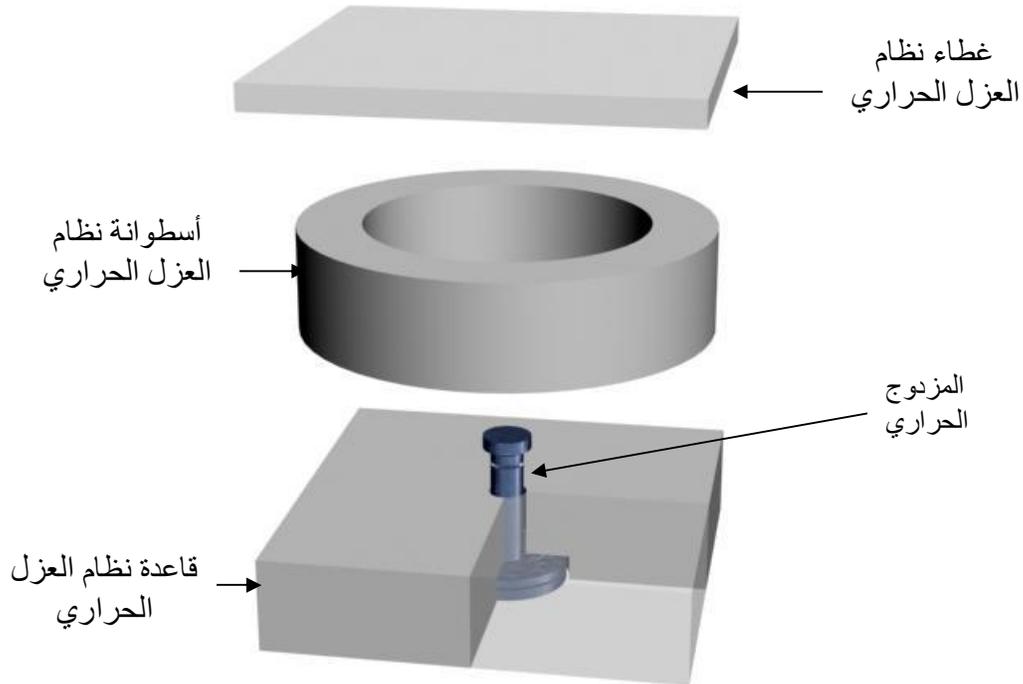


الشكل III-11 مراحل استخراج عناصر التسخين من قالب التشكيل

## III-2.2.5 صناعة نظام العزل الحراري

يصنع نظام العزل الحراري أساسا من ألواح الألومينا المسامي، وهو يتألف من ثلاث قطع، قاعدة دائرية أو مربعة، أنبوب أسطواني وغطاء دائري أو مربع. الشكل III-12

بعد قياس الأبعاد المطلوبة، نقوم برسم الشكل المطلوب فوق ألواح الألومينا و نقوم بقصها ، ثم معالجتها حراريا عند الدرجة 1200 م° لمدة ساعة، وهذا للتخلص من المواد العضوية التي تحتويها . كما أنه يسهل تشكيلها حسب الشكل المطلوب بعد معالجتها. نقوم بعد ذلك بتشكيلها حسب الأبعاد والشكل المطلوبين باستعمال مفرزة كهربائية، وشفرة حادة، وهذا بالنسبة للغطاء والقاعدة، أما أسطوانة نظام العزل فنقوم بقياس القطر المطلوب، ثم رسمه بواسطة مدور بنهايتين مدببتين، ثم قص الجزء الزائد بواسطة مفرزة كهربائية وشفرة حادة. بحيث يكون القص لجزء أقل ببعض المليمترات، عما هو مطلوب ثم نقوم بإزالة المليمترات الزائدة باستعمال مبرد. ثم نقوم بعملية صقل بواسطة أوراق كربيد السليكون ذو حبيبات صغيرة وهذا للحصول على سطح خارجي أملس لأسطوانة نظام العزل الجديدة ( ذات الأبعاد الجديدة بعد القص ).ونقوم بإحداث التجويف الداخلي بنفس الطريقة السابقة ، و العملية تتطلب دقة ومهارة لكي نحصل على الأبعاد المطلوبة بدقة بعد ذلك يتم إحداث منطقة عبور المزدوج الحراري، في مركز قاعدة نظام العزل، و إحداث مكان توضع قاعدة المزدوج الحراري داخل قاعدة نظام العزل، وذلك بإحداث أخدود بأبعاد قاعدة المزدوج الحراري في الجهة السفلية لقاعدة نظام العزل الحراري.

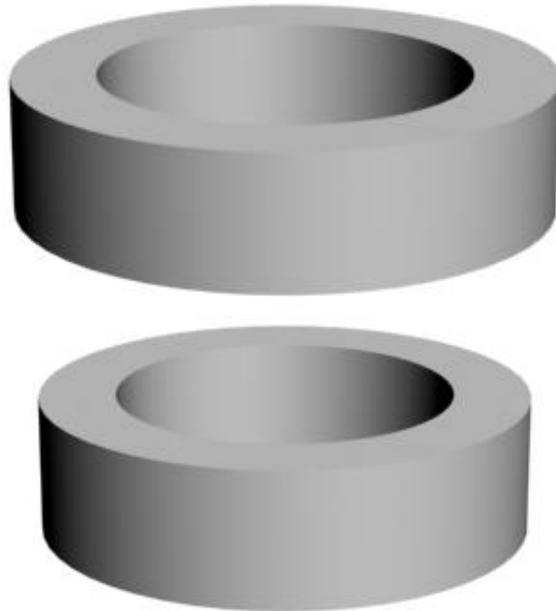


الشكل III-12 أجزاء نظام العزل الحراري

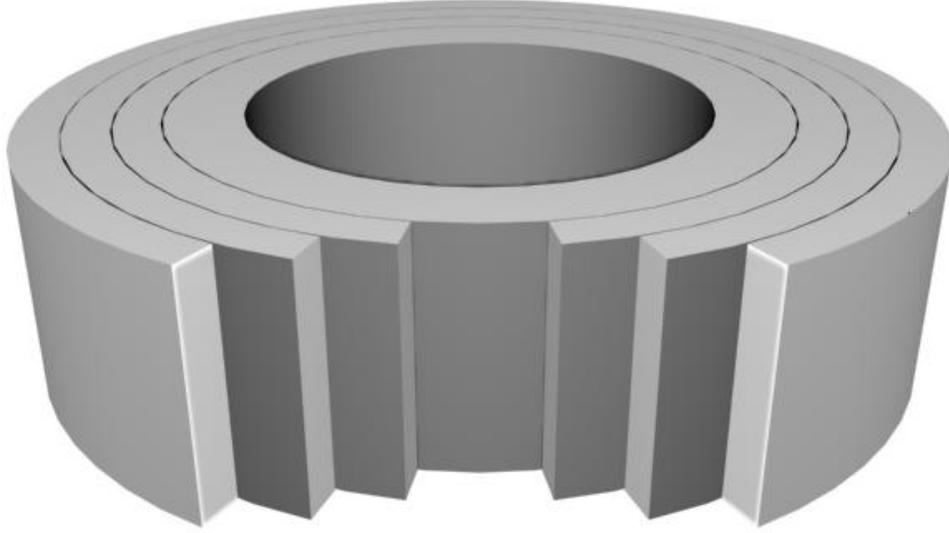
**III-3.2.5 تحضير نظام العزل الحراري لدراسة أثره على التسخين**

لدراسة تأثير اتساع نظام العزل الحراري، المصنوع من ألواح الألومينا المسامي قمنا بصناعة اسطوانتين بقطرين داخليين مختلفين، وبسمك متساوي قدره 0.7 سنتيمتر، الأولى قطرها الداخلي يزيد بحوالي 6 ملليمتر عن القطر الخارجي لعنصر التسخين المقدر بـ 4.9 سنتيمتر، أي أنه عند وضع عنصر التسخين داخله يكون الفضاء الفاصل بين عنصر التسخين وأسطوانة نظام العزل الحراري، بسمك حوالي 3 ملليمتر. أما نظام العزل الحراري الثاني، فهو بقطر داخلي يقدر بحوالي 8.1 سنتيمتر، أي أن الفضاء الفاصل بين عنصر التسخين وأسطوانة نظام العزل الحراري عند وضعه داخلها (في مركزها) ، هو حوالي 1.5 سنتيمتر . أما غطاء نظامي العزل فهو بسمك 1 سنتيمتر، وقاعدتهما هي بسمك 3 سنتيمتر ،مع وجود أخدود في أسفلها عند مركزها، بقطر 1.5 سنتيمتر وسمك 1 سنتيمتر، هو مكان توضع قاعدة المزدوج الحراري كما سبق ذكره في السابق.

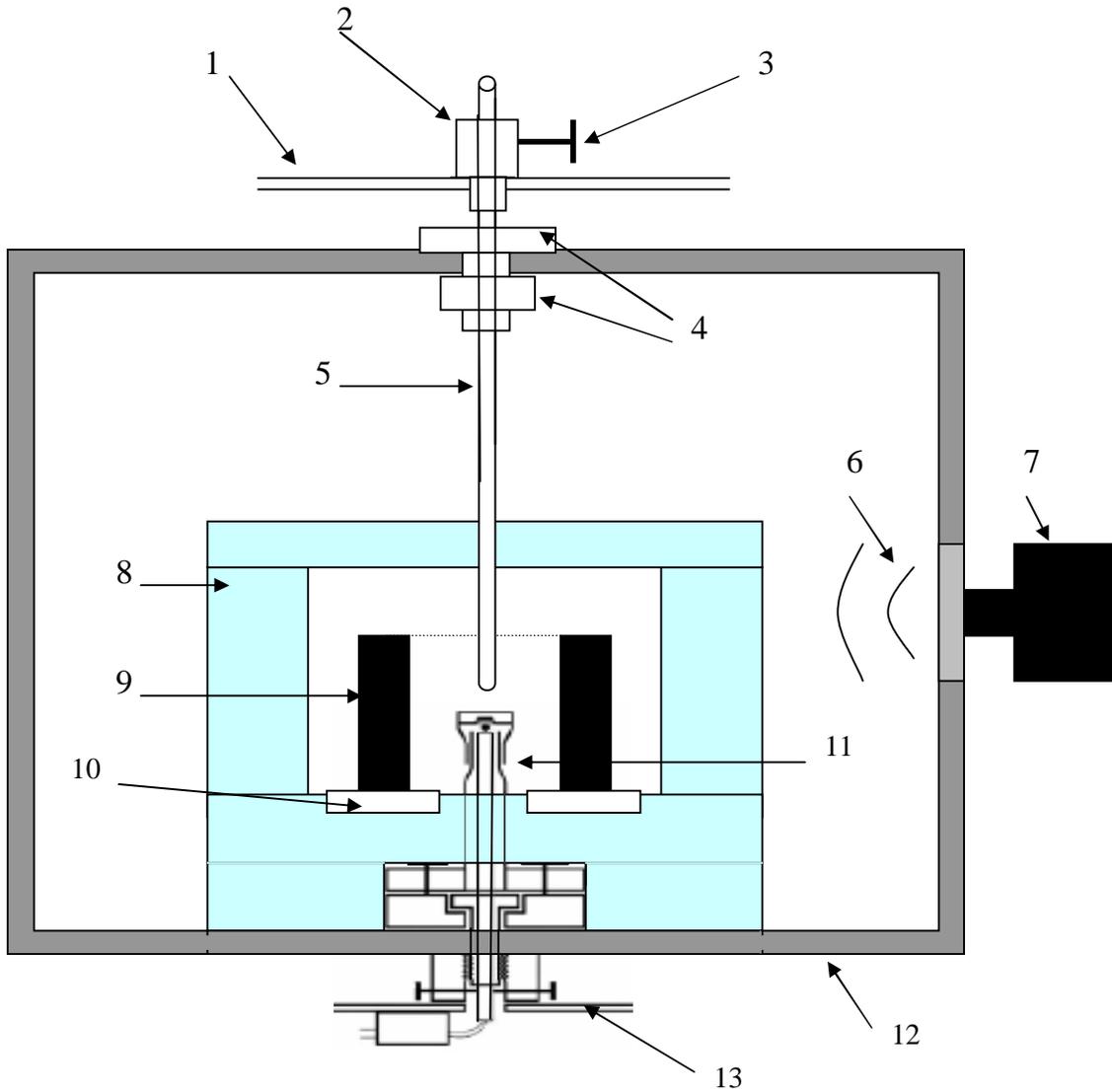
ولدراسة تأثير سمك نظام العزل الحراري ،على التسخين بموجات الميكرو، قمنا بصناعة أسطوانة من ألواح الألومينا المسامي، بقطر داخلي 5.5 سنتيمتر وقطر خارجي 12.1 سنتيمتر أي بسمك 3.3 سنتيمتر ثم قمنا بإنقاص السمك في كل مرة وهذا بقياس القطر الجديد ثم رسمه بواسطة مدور بنهايتين مدببتين، ثم قص الجزء الزائد بواسطة مفرزة كهربائية وشفرة حادة. بحيث يكون القص لجزء أقل ببعض المليمترات عما هو مطلوب، ثم نقوم بإزالة المليمترات الزائدة ،باستعمال ميرد ثم نقوم بعملية صقل بواسطة أوراق كربيد السليكون ذو حبيبات صغيرة، وهذا للحصول على سطح خارجي أملس، لأسطوانة نظام العزل الجديدة ( ذات الأبعاد الجديدة بعد القص ).



الشكل III- 13 أسطوانتي نظام العزل بسمك متساوي وبقطر داخلي مختلف



الشكل III-14 كيفية إنقاص سمك أسطوانة نظام العزل الحراري



**الشكل III- 15** منظومة التسخين المستعملة والمحتوية على مزدوجين حراريين علوي وسفلي  
 (1) الجدار الخارجي العلوي لفرن موجات الميكرو (2) أداة تثبيت المزدوج الحراري العلوي  
 (3) برغي تثبيت (4) برغي مثقوب وصامولة (5) مزدوج حراري علوي (6) موجات الميكرو  
 (7) مغنطرون (8) نظام العزل الحراري من ألواح الألومينا المسامي (9) عنصر تسخين  
 (10) قطع من الألومينا (11) مزدوج حراري سفلي (12) الجدار الداخلي لحجرة الفرن  
 (13) غطاء تابع للجدار الخارجي السفلي للفرن



الشكل III - 16 أجزاء نظام العزل الحراري

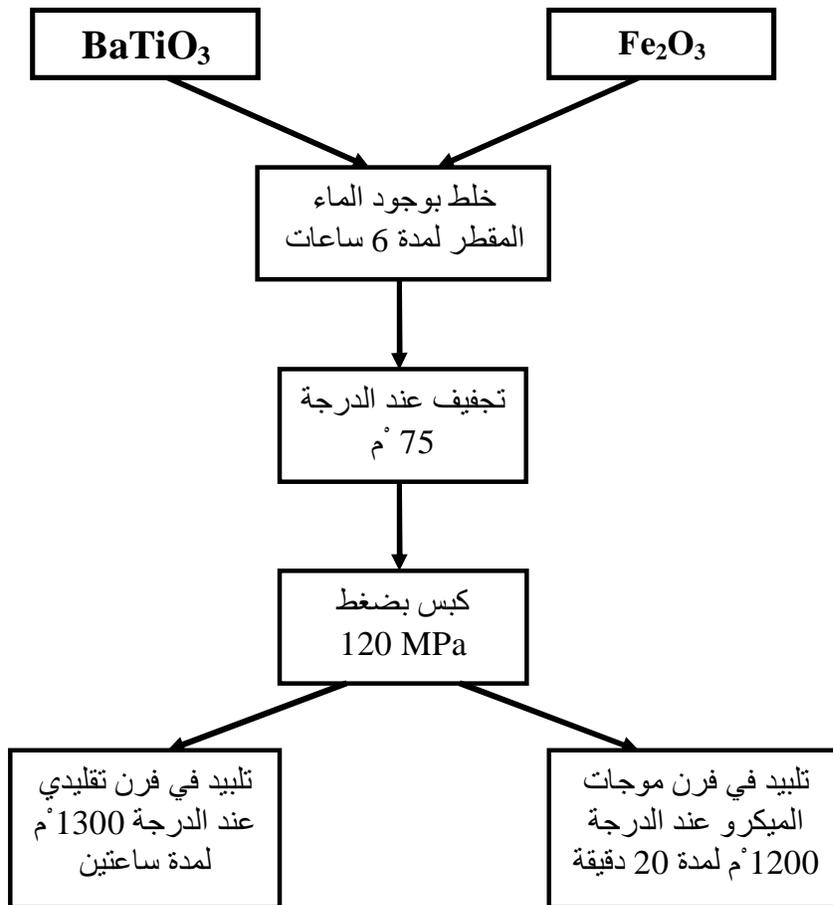


الشكل III - 17 عنصر التسخين داخل نظام العزل الحراري

### III- 6 تحضير عينات تيتانات الباريوم – أكسيد الحديد ( $BaTiO_3-Fe_2O_3$ ) :

يتم تحضير العينات انطلاقاً من مسحوق  $BaTiO_3$  مع إضافة نسب معينة من  $Fe_2O_3$  تبعاً للعلاقة  $(1 - x) BaTiO_3 + x Fe_2O_3$  أين  $x$  يأخذ القيم 7، 15، و 20 مول . بعد ذلك نقوم بخلط المسحوق في وجود الماء المقطر لمدة 6 ساعات، بعدها يتم تجفيف المسحوق عند الدرجة حوالي 70 °م ثم يتم كبس المسحوق الناتج بواسطة مكبس هيدروليكي، على شكل عينات أسطوانية بقطر 1.3 سنتيمتر وبسمك يتراوح من 1 إلى 2 ملليمتر بضغط يقدر بحوالي 120 MPa من أجل كل العينات، لأن قيم الضغط العالية تؤدي إلى حدوث تشققات في العينات المكبوسة .

بعد تحضير العينات يتم معالجتها حرارياً ومن أجل كل نسب الإضافات بطريقتين مختلفتين ، الطريقة الأولى تتم في فرن تقليدي عند الدرجة 1300 °م لمدة ساعتين وبسرعة تسخين تقدر بـ 5 °م / دقيقة ، أما الطريقة الثانية فتتم في فرن موجات الميكرو باستعمال سسبيتور عند الدرجة 1200 °م ولمدة 20 دقيقة وبسرعة متوسطة تقدر بـ حوالي 120 °م / دقيقة ( الشكل III- 18).



الشكل III- 18 مراحل تحضير عينات تيتانات الباريوم – أكسيد الحديد (  $BaTiO_3-Fe_2O_3$  )

**7-III تقنيات القياس والتحليل****1.7-III التحليل باستعمال أشعة X**

طرق التحليل باستعمال أشعة X، كثيرة ومن بينها تلك التي تعرف بطريقة المسحوق، والتي يستعمل فيها إشعاع سيني وحيد اللون. توجد طريقتان أساسيتان باستعمال طيف الانعراج ، الأولى تعرف بطريقة ديبياي شرر ويتم فيها تسجيل الطيف على فلم حساس، عبارة عن شريط يوضع داخل غرفة تعرف بغرفة ديبياي. أما الطريقة الثانية، فهي دقيقة في معلوماتها، ويتم تسجيل النتائج فيها باستعمال عداد ، حيث يوصل هذا الأخير بجهاز راسم يقوم برسم مخطط الانعراج ( كمية الإشعاع (شدة الخط) بدلالة زاوية براغ  $2\theta$  ). أما في الوقت الحاضر، أصبحت العملية أكثر دقة، حيث أستبدل الراسم ببرنامج كمبيوتر يؤدي نفس الغرض. هذه التقنية تسمح بتأشير خطوط الانعراج ، حيث نرفق بكل خط قيمتين محسوبتين وهما الشدة (I) والفاصلة ( $d_{hkl}$ ) هذه الأخيرة تحسب من قانون براغ  $2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda$  . حيث  $\lambda$  ، طول موجة الأشعة السينية.  $n$  ، رتبة الانعراج .  $d_{hkl}$  ، المسافة بين المستويات البلورية.  $\theta$  ، زاوية براغ لانعراج الأشعة السينية.

وعليه انطلاقا من المخطط يتم الحصول على قائمة للثنائيات (  $d_{hkl}$  , I ) ، هذه القائمة تكون مميزة لكل عنصر أو مركب. مثل هذه القوائم تم إعدادها و وضعت على شكل كتب و في نظام بطاقات تعرف ببطاقات A.S.T.M . وهي مرتبة تبعا لقيم  $d_{hkl}$  للخطوط الثلاثة الأكثر شدة لكل عنصر أو طور . وهي كافية لتحديد ماهية مادة ما .

إذن للقيام بعملية التحليل الكيفي لمادة مجهولة، يكفي تأشير خطوط الانعراج وترتيبها حسب تزايد شدتها، ثم العودة إلى بطاقات A.S.T.M، للكشف عن هذا العنصر أو الطور. تزداد هذه الطريقة تعقيدا في حالة احتواء المادة على أكثر من طور واحد. لكن الطريقة تبقى دوما نفسها حيث يتم حساب  $d_{hkl}$  خطوط الانعراج وترتيبها حسب شدتها، ثم البحث في بطاقات A.S.T.M بالاعتماد على الخطوط الثلاثة الأكثر شدة، وفي حالة استحالة تحديد الطور، فإن الخط الثاني يلغى ويعاد البحث من جديد بالاعتماد على الخط الأول والثالث والرابع، وهكذا إلى غاية تحديد الطور الأول . بعد ذلك تلغى كل الخطوط التابعة لهذا الطور، ثم يعاد ترتيب الخطوط المتبقية من جديد، حسب شدتها والعودة مرة أخرى لبطاقات A.S.T.M لتحديد الطور الآخر.

**2.7-III قياس الكتلة الحجمية**

تحسب الكتلة الحجمية للعينات المكبوسة والملمدة بقياس أبعادها وكتلتها ، فأبعاد العينات المتمثلة في القطر والسلك، يتم قياسها بواسطة جهاز بالمر، الذي تصل دقته إلى  $10 \mu m$  ، أما كتلة العينات فتقاس بواسطة ميزان حساس تصل دقته إلى  $0.001 mg$  .

### III-3.7 قياس نسبة التليبد

تحسب نسبة التليبد، بقسمة الكتلة الحجمية للعينة، على القيمة النظرية للكتلة الحجمية . وفقا للعبرة التالية

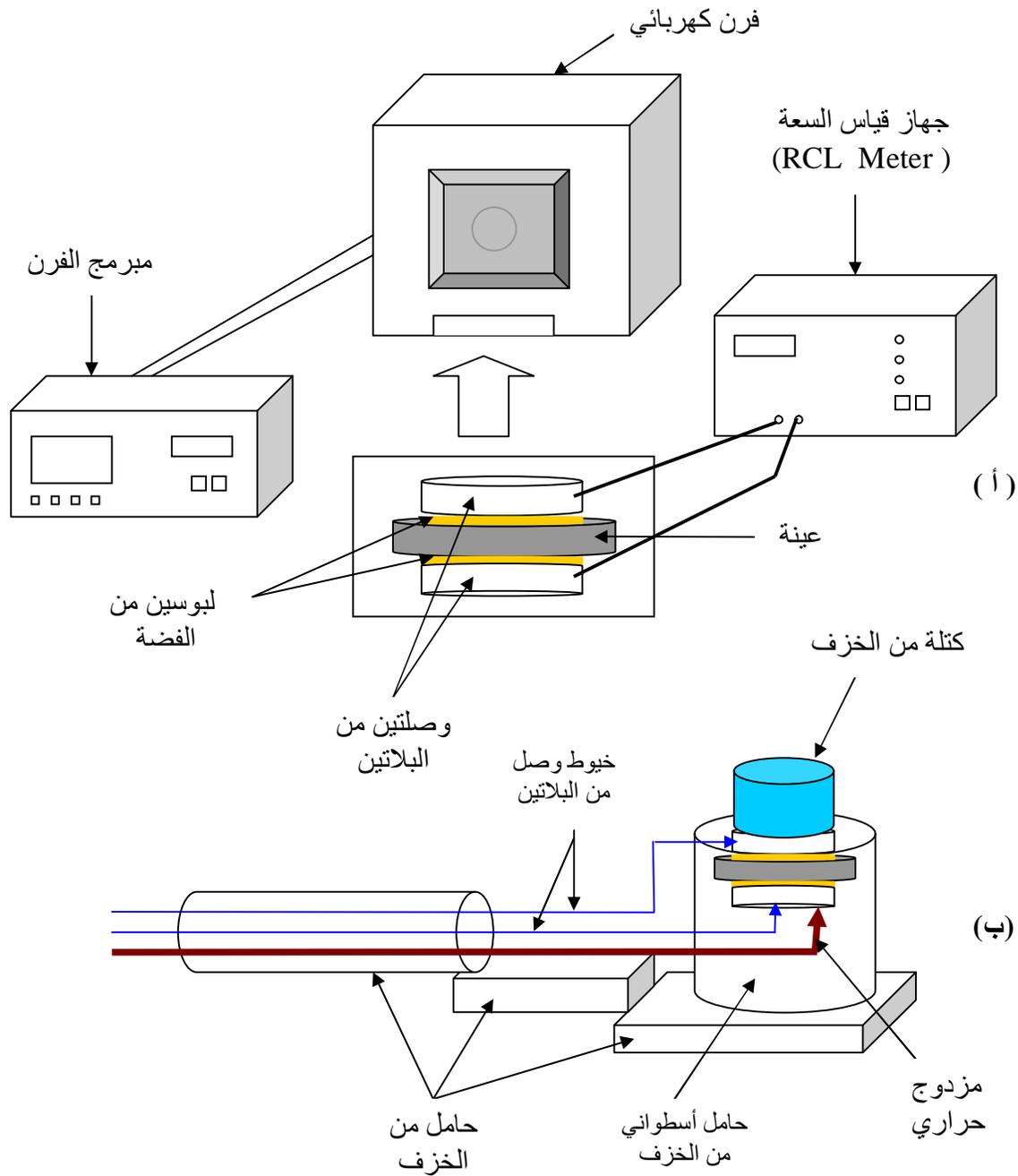
$$\text{نسبة التليبد (\%)} = (\rho_{\text{exp}} / \rho_{\text{th}}) \times 100$$

### III-4.7 قياس ثابت العزل النسبي وزاوية فقدان العازلية

من أجل الدراسة الكهربائية للعينات، نقوم بصقل العينات بواسطة أوراق كربيد السيلكون، ثم باستعمال عجينة الماس للصقل النهائي، مع المحافظة على توازي سطحي العينة، بعد ذلك نقوم بطلاء سطحي العينة بمادة ماءات الفضة، من أجل تكوين طبقة من الفضة على شكل لبوسي التوصيل الكهربائي. ثم نقوم بتسخينها عند الدرجة 700°م لمدة 15 دقيقة لضمان التحام لبوسي الفضة بسطحي العينة. وبالتالي إجراء القياسات بشكل جيد ، ولقياس ثابت العزل وزاوية فقدان العازلية، نقوم بوضع العينة المحضرة بين وصلتين كهربائيتين من البلاتين، داخل فرن تصل درجة حرارته القصوى إلى 700°م وملحق بمبرمج لتشغيله، حيث يتحكم في سرعة تسخينه التي تتراوح ما بين 5 و 20°م/دقيقة و الشكل III-19 يوافق التركيبة الموافقة لذلك. حققنا قياس السعة وزاوية فقدان العازلية، بواسطة جهاز قياس السعة (RCL Meter) ، عند تردد قدره 1.KHz. ويحسب ثابت العزل النسبي، من العلاقة التي تربطه بالسعة بالشكل التالي:

$$e_r = \frac{C \times d}{e_0 \times S}$$

حيث d سمك العينة و S مساحة اللبوسين و  $\epsilon_0$  يمثل سماحية الفراغ وهو مساوي إلى  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m أما زاوية فقدان العازلية  $D = \tan \delta$  تعطى مباشرة على جهاز القياس.



الشكل III- 19 ( أ ) : التركيبية المستعملة لقياس ثابت العزل وزاوية فقدان العازلية بدلالة درجة الحرارة

( ب ) : حامل العينات من الخزف

**8-III أهم الأجهزة المستعملة****1.8-III الفرن**

استعملنا في دراستنا، فرنين كهربائيين. أحدهما يستعمل خاصة للكسنة ، قابل للبرمجة تصل درجة حرارته القصوى إلى 1100° م من نوع FIMANFREDI . أما الفرن الثاني، استعمل لتلييد العينات عند درجات الحرارة العالية ، تصل درجة حرارته العظمى، إلى 1500 ° م وهو قابل للبرمجة .

**2.8-III الميزان**

أستخدم الميزان الحساس، لقياس كتل كل المساحيق وكذا كتل العينات الملبدة ، وهو من نوع Mettler تصل دقته إلى 0,001 mg.

**3.8-III البالمر**

لقد أستعمل هذا الجهاز ،لمعرفة سمك وقطر العينات الملبدة وتصل دقة قياسه إلى  $10 \mu\text{m}$  .

**4.8-III جهاز حيود الأشعة السينية**

أستخدم هذا الجهاز، من أجل التعرف على طبيعة المواد المستعملة، وعلى الأطوار والمركبات المتشكلة ، وجهاز حيود الأشعة السينية من النوع D8-Advanced لشركة Bruker-Sienans والذي يعمل وفق هندسة براغ ،ومنبع الأشعة ينتج من مهبط النحاس  $\lambda_{K\alpha\text{Cu}}$  والموافق لطول الموجة 1.5418 والمغذى بمنبع توتر مستقر، تحت فرق جهد قدره 40 KV وشدة تيار 10 mA .

**5.8-III جهاز الكبس**

أستخدم جهاز كبس هيدروليكي (هيدروستاتيك) ، من أجل كبس العينات وعناصر التسخين، كما أستخدم جهاز كبس يدوي، لأجل استخراج عناصر التسخين من قالب التشكيل .

### الفصل الرابع النتائج ومناقشتها

نتطرق في هذا الفصل، إلى نتائج اختبارات التسخين، التي أنجزت على مختلف عناصر التسخين. مع محاولة تقديم تفسير للظاهرة، وأسباب الاختلافات الموجودة بينها، وتأثير الخواص العزلية لمادة عنصر التسخين، على عملية التسخين بموجات الميكرو لهذه الأخيرة، كما نتطرق في هذا الفصل إلى التأثير الذي تلعبه بعض الأبعاد بطريقة أو بأخرى ككثافة عنصر التسخين، تأثير تصميم نظام العزل الحراري، التغذية المتقطعة بإستطاعات خروج مختلفة لموجات الميكرو (تأثير شدة الحقل)، وتدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين (تأثير توزيع الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة التسخين). وينتهي الفصل باستغلال منظومة التسخين في تلييد عينات من تيتانات الباريوم مضاف إليها نسب مختلفة من أكسيد الحديد، لنقوم بدراسة خصائص المركب الناتج (الكثافة، الأطوار، الخواص العزلية) ومقارنتها مع النتائج التي حصلنا عليها بالمعالجة التقليدية. وفيما يلي سرد للنتائج المتحصل عليها مع محاولة مناقشتها.

#### 1-IV اختيار ودراسة تأثير ضغط الكبس

كما هو مبين في الفصل السابق، فإن قيمة الضغط المطبق هو أي 3 طن / م<sup>2</sup>. لتشكيل عناصر التسخين وكبس العينات، وهذه القيمة لم تأت هكذا عشوائيا، بل جاءت بعد دراسة و تجارب متعددة، تبين من خلالها أنها مناسبة لتشكيل، جميع عناصر التسخين و العينات من جهة، ومن جهة أخرى، تبين أنها تعطي نتائج أحسن، في اختبارات التسخين لأغلب عناصر التسخين، وباختلاف المواد الداخلة في تصنيعها. لقد استخدمنا قيم الضغط الواقعة في المجال من 1-7 طن / م<sup>2</sup> بزيادة 1 طن / م<sup>2</sup> في كل مرة إلى غاية 3 طن / م<sup>2</sup> ثم بزيادة 1 طن / م<sup>2</sup> بعد ذلك إلى غاية 7 طن / م<sup>2</sup>. لقد صادفتنا مشكلة صعوبة تشكيل عناصر التسخين من أجل قيم الضغط الأقل من 3 طن / م<sup>2</sup>، حيث أنه وبمجرد استخراجها من القالب تتشوه أو أنها تتهشم بمجرد لمسها ومحاولة نقلها من على القالب لتلييدها وذلك على الرغم من إضافتنا لمادة عضوية غروية (بياض البيض). أما القيم الأعلى فكانت مناسبة لتشكيل جميع عناصر التسخين، مع وجود تشقق على شكل حلقي في الجهة السفلية لعناصر التسخين عند الكبس وهذا عند تطبيق ضغط 7 طن / م<sup>2</sup>، يمكن إرجاع ذلك إلى وجود تجمعات حبيبية ذات أبعاد معتبرة، فزيادة الضغط عن قيمة حدية معينة تعني أن الحبيبات ستخزن القوة الزائدة على شكل انكماش مرن وبالتالي عند خروج عنصر التسخين من قالب الكبس والتشكيل يتشقق بفعل هذه القوة المخزنة. لقد قمنا بإجراء اختبارات التسخين على جميع عناصر التسخين التي تم تشكيلها بكبسها بمختلف قيم الضغط المحصورة بين 3 طن / م<sup>2</sup> و 7 طن / م<sup>2</sup>، حيث أن النتائج أظهرت أن تسخين العناصر، كان أحسن من أجل الضغط 3 طن / م<sup>2</sup> في أغلبها وتتناقص درجة التسخين (درجة الحرارة

التي يستطيع عنصر التسخين الوصول إليها بعد نفس الزمن )، بزيادة قيمة الضغط وذلك في أغلب عناصر التسخين وباختلاف المواد الداخلة في تصنيعها. على الرغم من أننا لم ندرس في هذه المرحلة تأثير كثافة عنصر التسخين، في تسخين هذا الأخير، إلا أن تناقص درجة التسخين بزيادة قيمة ضغط الكبس، قد يعزى إلى الدور الذي قد يلعبه زيادة هذا الأخير في زيادة كثافة عناصر التسخين، وبالتالي التخفيض في عدد الفراغات. و أهم نتائج المتحصل عليها مدونة في الجدول 1-IV

يظهر الجدول 1-IV أننا استعملنا مادة الكاولان كإضافات، لقد كان الهدف من إضافة الكاولان من الصنف DD3 المحلية هو زيادة تماسك جزيئات كربيد السليكون ليسهل تشكيلها ، لكن أثبتت النتائج أن إضافة الكاولان، يعمل على تخفيض قدرة العناصر على التسخين بموجات الميكرو ويعود ذلك لأنها من المواد الشفافة لموجات الميكرو بحيث أنها تملك معامل فقدان ضعيف ، ولهذا السبب استبدلناها بمادة عضوية غروية ( بياض البيض ) من أجل ضمان تماسك جزيئات كربيد السليكون عند التشكيل . تظهر النتائج الموجودة في الجدول كذلك أن عناصر التسخين المصنوعة من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسب من 2 إلى 10 % من أكسيد الزنك ( ZnO ) استطاعت أن تصل إلى درجات حرارة عالية ، لكن على الرغم من أنها نجحت في اختبارات التسخين في البداية، إلا أنها أظهرت بعض العيوب، بحيث أنه عند ارتفاع درجة حرارتها إلى درجات عالية، يتبخر أكسيد الزنك الموجود فيها ويلوث نظام العزل وقبعة المزدوج الحراري مما يجعل هذا الأخير لا يقيس درجة الحرارة بكيفية صحيحة، نتيجة تفاعل طبقة أكسيد الزنك الملتصقة على سطحه مع موجات الميكرو، ويصبح نظام العزل غير شفاف لموجات الميكرو نتيجة وجود طبقة من أكسيد الزنك على السطوح الداخلية له. كما أنه عند إعادة اختبارات التسخين من أجل نفس عناصر التسخين، تبدي انخفاضا كبيرا لدرجة الحرارة التي تستطيع الوصول إليها بحيث تصبح لا تتعدى 1100 م° بعد 10 دقائق في أحسن الأحوال ، وهذا ما يعني أن خروج نسبة معتبرة من ZnO تنقص من درجة امتصاص عناصر التسخين لموجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة ، ولهذا يمكن القول أن هذه العناصر غير صالحة من أجل معالجة المواد الخزفية لأن استعمالها يؤدي إلى تلويث المواد المعالجة و نظام العزل الحراري و المزدوج الحراري.

سرعة التسخين المتوسطة	درجة الحرارة القصوى	زمن التسخين	الضغط المطبق عند التشكيل	التركيب الكيميائي
101 م / دقيقة	1038 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
61 م / دقيقة	641 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	الصناعي الصنف الأول
53 م / دقيقة	562 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
123 م / دقيقة	1268 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	الصناعي الصنف الثاني
121 م / دقيقة	1242 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
95 م / دقيقة	979 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	الصناعي الصنف الثالث
75 م / دقيقة	781 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
59 م / دقيقة	616 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	الصناعي الصنف الثالث
42 م / دقيقة	449 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
103 م / دقيقة	1057 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 1 + 5 %
91 م / دقيقة	945 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا كاولان
42 م / دقيقة	451 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
37 م / دقيقة	397 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 1 + 15 %
38 م / دقيقة	410 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا كاولان
30 م / دقيقة	329 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
41 م / دقيقة	445 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 1 + 25 %
30 م / دقيقة	331 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا كاولان
26 م / دقيقة	285 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
36 م / دقيقة	389 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 1 + 30 %
33 م / دقيقة	365 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا كاولان
30 م / دقيقة	334 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
110 م / دقيقة	1129 م	10 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 2 + 2 %
101 م / دقيقة	1040 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا ZnO
105 م / دقيقة	1077 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
305 م / دقيقة	1403 م	4 دقائق و 30 ثانية	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 2 + 5 %
136 م / دقيقة	1385 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا ZnO
130 م / دقيقة	1323 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
264 م / دقيقة	1350 م	5 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 2 + 10 %
134 م / دقيقة	1361 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا ZnO
199 م / دقيقة	1223 م	6 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	كربيد السليكون
161 م / دقيقة	1316 م	8 دقائق	3 طن/م <sup>2</sup>	ص 2 + 5 %
125 م / دقيقة	1278 م	10 دقائق	5 طن/م <sup>2</sup>	وزنا ZnO + 5 % K
106 م / دقيقة	1090 م	10 دقائق	7 طن/م <sup>2</sup>	

الجدول 1-IV تأثير الكبس على التسخين بموجات الميكرو

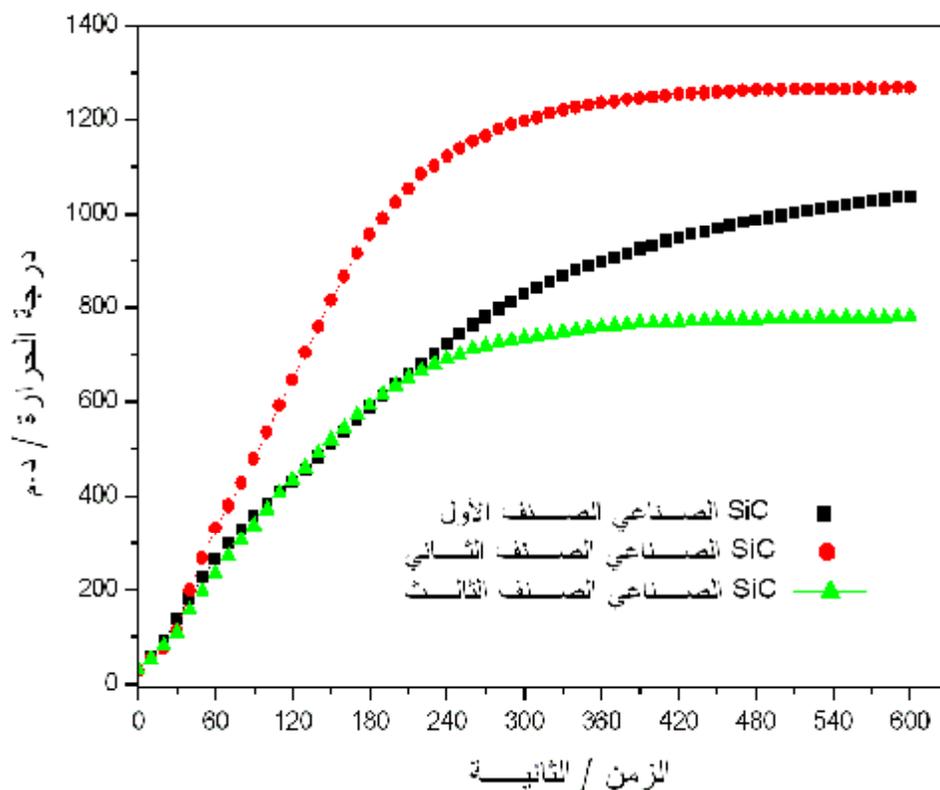
#### 2-IV اختيار ودراسة تأثير نوعية و صنف الـ SiC الصناعي على التسخين

لقد توفر لدينا ثلاث أصناف من SiC الصناعي، وكان لزاما علينا اختيار أحدها، أو أيها الأحسن من حيث قدرته على التسخين بموجات الميكرو، وكذلك عدم إظهاره لعيوب كالبقع الذائبة مثلا وهذا من أجل استعماله لاحقا . ولهذا الغرض قمنا بصناعة عناصر التسخين، من الأصناف الثلاثة وإجراء اختبارات التسخين عليها ، كما قمنا بتدعيم ذلك للتأكد و فهم أسباب الاختلاف الموجود بينها، بدراسة الخواص العزلية لعناصر التسخين المصنوعة من الأصناف الثلاثة.

#### 1-2-IV اختبارات التسخين:

بعد صناعة عناصر التسخين، لكل أصناف الـ SiC الصناعي، يتم وضعها الواحد تلو الآخر في وسط الحجرة داخل نظام العزل الحراري، بحيث يكون رأس المزدوج الحراري عند مركز السببكتور (عنصر التسخين) ، بيرمج الفرن باستطاعته القصوى المقدر بـ 900 واط ( 100 % ) و بيرمج زمن التسخين بـ 10 دقائق عن طريق لوح التحكم ، وتؤخذ درجة الحرارة الابتدائية قبل بدأ الإختبار بعدها يشغل الفرن وتسجل درجة الحرارة كل 10 ثواني والشكل 2-IV يمثل المنحنيات الممثلة لاختبارات التسخين للثلاثة أصناف لكربيد السليكون.

إن أول ما يمكن ملاحظته من خلال النتائج التي تظهرها المنحنيات الممثلة لإختبارات التسخين للأصناف الثلاثة، لكربيد السليكون الصناعي ، هي أن عنصر التسخين المصنوع من كربيد السليكون الصنف الثاني، كان الأحسن من حيث درجة الحرارة التي استطاع الوصول إليها في آخر الإختبار بعد 10 دقائق، حيث استطاع الوصول إلى حوالي 1270 م° ، في حين وصلت بالنسبة للمصنوع من الصنف الأول إلى حوالي 1040 م° وبالنسبة للمصنوع من الصنف الثالث إلى حوالي 780 م° ، وبسرعات تسخين متوسطة تقدر بـ 124 م°/د، و 101 م°/د و 75 م°/د للعناصر الثلاثة السابقة على التوالي . و مما يجب الإشارة إليه هو أنها جميعها أظهرت بقع ساخنة، خلال التسخين مع الاختلاف في حجم هذه البقع ومكان تواجدها، حيث كانت كبيرة نوعا ما في الصنف الثاني وصغيرة نوعا ما في الصنف الأول وأصغر أكثر في الصنف الثالث. هذه البقع تكون نتيجة ارتفاع حرارة منطقة محلية قبل باقي المناطق في عنصر التسخين و هي تحدث في الغالب نتيجة عدم انتظام الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة التسخين ، حيث أن درجة الحرارة الموضعية ( المحلية ) تتغير داخل المادة ويكون التغير واضح وكبير في المواد ذات معامل الفقدان العزلي الضعيف نسبيا ، ويمكن لارتفاع درجة الحرارة بشكل سريع في حجم محلي داخل المادة أن يؤدي إلى انفلات حراري داخل عنصر التسخين وهذا ما لاحظناه في عنصر التسخين المصنوع من الصنف الأول عند الزيادة في زمن التسخين لأكثر من 10 دقائق .



الشكل IV-1 منحني التسخين لعناصر تسخين مصنوعة من ثلاث أصناف من كربيد السليكون الصناعي

مما نلاحظ كذلك من المنحنيات أنه يمكن أن نميز ثلاث مراحل تسخين مختلفة و للثلاثة أصناف من كربيد السليكون .

**المرحلة الأولى من التسخين :** تكون نسبة التسخين فيها بطيئة نسبياً حيث يبدأ تفاعل جزيئات كربيد السليكون مع موجات الميكرو وامتصاصها لطاقة هذه الأخيرة وتحويلها إلى حرارة ، لترتفع درجة حرارة عنصر التسخين شيئاً فشيئاً و تختلف مدة هذه المرحلة باختلاف صنف الـ SiC الصناعي الداخل في تركيب عنصر التسخين وهي تبدو قصيرة نسبياً في الصنفين الثاني والأول وأطول بعض الشيء في الصنف الثالث.

**المرحلة الثانية من التسخين :** مع ارتفاع درجة حرارة جزيئات الـ SiC الصناعي ، تزداد فعالية جزيئات كربيد السليكون الصناعي لامتصاص موجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة إلى حد بلوغها درجة الحرارة الحرجة  $T_c$  أين تقترن بشكل جيد مع موجات الميكرو وترتفع درجة حرارتها بشكل سريع ، و هذا على الأرجح ناتج عن اهتزاز جزيئات كربيد السليكون بسعات متزايدة تحت تأثير الحرارة من جهة وقوة الحقل الكهرومغناطيسي المطبق من جهة أخرى وهذا عند بلوغها درجة الحرارة الحرجة  $T_c$  مما يسمح بدوران أكبر و أسهل لثنائيات القطب . وتختلف درجة الحرارة الحرجة وشدة الاقتران بموجات الميكرو باختلاف

صنف كربيد السليكون الصناعي ، حيث نلاحظ أن امتصاص عناصر التسخين للطاقة الكهرومغناطيسية في هذه المرحلة يكون كبير في الصنف الثاني وينقص في الصنف الأول لينقص أكثر في الصنف الثالث.

#### المرحلة الثالثة من التسخين :

في المرحلة الأخيرة من التسخين تبدأ سرعة التسخين في التباطئ ، وتقرب جزيئات كربيد السليكون بالتدريج من عتبة الامتصاص التي عندها تتوقف جزيئات الـ SiC الصناعي عن امتصاص المزيد من موجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة. لأن كل الجزيئات المكونة لعنصر التسخين تكون قد حولت طاقة موجات الميكرو الواردة إليها ووصلت إلى حد التشبع. يمكن تحديد بداية هذه المرحلة بـ حوالي 800 م° ، 1100 م° ، 600 م° للأصناف الأول والثاني والثالث على التوالي. كما يمكن تقدير درجة الحرارة الموافقة لحد التشبع للأصناف الثلاثة بـ 1300 م° للصنف الثاني و800 م° للصنف الثالث نتيجة أن منحنيات التسخين لهذه الأخيرة تبدو مسطحة في نهاية هذه المرحلة كما أن ارتفاع درجة حرارة التسخين بطيئة جدا تكاد تكون ثابتة. وزيادة زمن التسخين لا تزيد من درجة حرارة التسخين أكثر. أما الصنف الأول فيمكن تقديرها لأكثر من 1050 م° لأن منحنى التسخين في نهاية المرحلة يبدو متزايد بعض الشيء.

لتفسير الاختلاف الموجود بين منحنيات التسخين الثلاث يجب فهم الآلية التي يتم بها تفاعل موجات الميكرو مع عناصر التسخين للأصناف الثلاث لكربيد السليكون الصناعي ، إن شدة تفاعل موجات الميكرو مع الأصناف الثلاثة لكربيد السليكون الصناعي تتعلق أساسا بالخواص العزلية لكل منها حيث أن كل صنف من كربيد السليكون يمتص مقدارا معيناً من طاقة موجات الميكرو ويحولها إلى حرارة وفق المعادلة التالية

$$P = 2pfe_0 e'' E^2 + 2pfm_0 m'' H^2$$

أين الطرف على يمين المعادلة يشير إلى الفقدان الكهربائي والمغناطيسي. على العموم ، الفقدان المغناطيسي مهمل، والفقدان الكهربائي هو فقط الذي يساهم بالطاقة الممتصة. وتصبح المعادلة من الشكل

$$P = 2pfe_0 e'' E^2 \quad (1)$$

حيث P : الطاقة الممتصة والمحوّلة إلى حرارة في وحدة الحجم ( واط / م<sup>3</sup> )

$$f \text{ تردد موجات الميكرو} = 2.45 \text{ GHz}$$

$$e_0 \text{ سماحية الفراغ} = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ (فراذ / متر).}$$

$e''$  معامل فقدان العزلية للمادة الخزفية وهو تابع في درجة الحرارة ويعبر عنه كذلك بـ

$$e'' = e' \tan d \text{ حيث } e' \text{ ثابت العزل الذي يمكن أن يكون قياسا لإستقطابية أي مادة بحقل كهربائي}$$

خارجي وحدته ( فراد / متر) و  $\tan d$  هو ظل الفقدان وهو قياس لمقدار امتصاص المادة لموجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة داخل المادة .

E شدة الحقل الكهربائي الداخلي لموجات الميكرو ( فولط / متر).

تبين المعادلة (1) أن الاستطاعة الممتصة تتغير خطيا مع التردد ، ثابت العزل النسبي ( $\epsilon'$ ) ، ظل الفقدان ( $\tan d$ ) ، ومربع الحقل الكهربائي الداخلي. ومن هذا يمكن أن يلاحظ أنه يتم الحصول على شدة تسخين مختلفة في عناصر التسخين المصنوعة من الأصناف الثلاثة لكربيد السليكون بحسب قيمة معامل فقدان العازلية  $e''$  لكل صنف من كربيد السليكون الصناعي. بمعنى كلما كان هذا المعامل كبير في القيمة كلما كان تسخين مادة كربيد السليكون الصناعي لعنصر التسخين بموجات الميكرو كبير أيضا . ومن منحنيات التسخين لمختلف عناصر التسخين لأصناف SiC الصناعي ، يمكن توقع ترتيب قيم معامل الفقدان للأصناف الثلاثة حيث يفترض أن تكون الأعلى بالنسبة للصنف الثاني ثم تنخفض في الصنف الأول لتنخفض أكثر في الصنف الثالث . وللتأكد من صحة الفرضية وفهم أسباب تغير المنحنيات ، ندرس الخواص العازلية للأصناف الثلاثة من كربيد السليكون الصناعي.

#### IV-2-2- دراسة الخواص العازلية:

##### IV-2-2-1 دراسة ثابت العزل

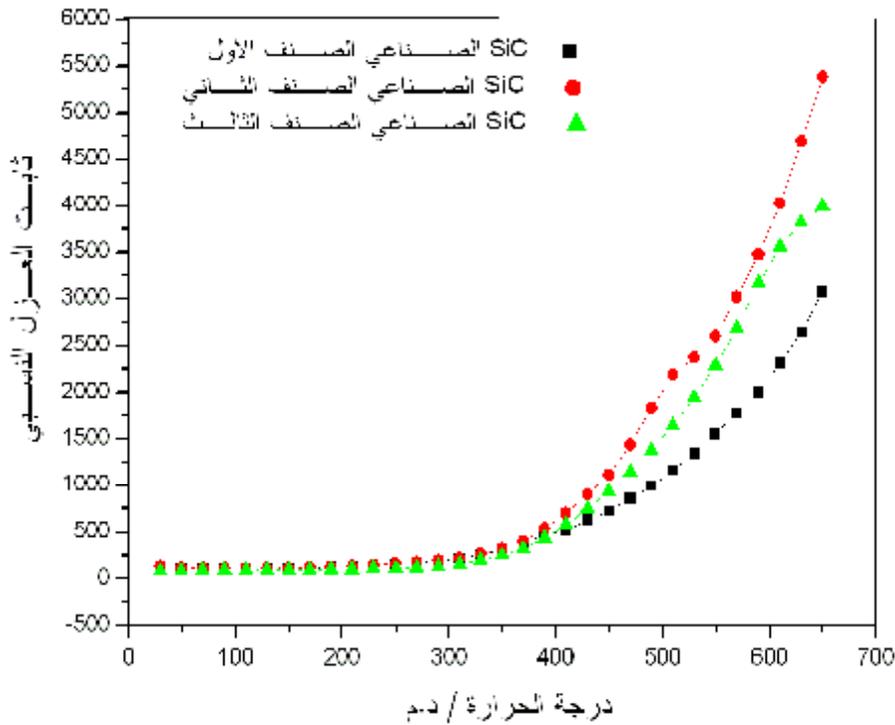
لقد قمنا بقياس ثابت العزل من أجل الثلاثة أصناف من كربيد السليكون وهي ممثلة في الشكل IV-2-2 إن ما يمكن ملاحظته من المنحنيات هو أن ثابت العزل يأخذ أكبر قيمة له عند الدرجة 30 م في الصنف الثاني بـ 135 ، أما في الصنفين الأول والثالث فيكون 128 و 101 على التوالي عند نفس درجة الحرارة. ما نلاحظه كذلك هو أن ثابت العزل النسبي يتزايد بشكل بطيء نوعا ما حتى حوالي الدرجة 350 م لجميع الأصناف تقريبا ، ثم بعد ذلك يزداد بشكل سريع مع اختلاف في نسبة التزايد من صنف إلى آخر ، بحيث يكون كبير في الصنف الثاني ثم بنسبة أقل في الصنف الأول والثالث. يعزى الاختلاف الموجود في ثابت العزل باختلاف أصناف كربيد السليكون الصناعي إلى اختلاف درجة نقاوة كل صنف و اختلاف نوعية الشوائب المتواجدة فيهم ، حيث أظهرت منحنيات انعراج الأشعة السينية ( الشكل III-7 ) مثلا وجود عنصر أكسيد السليكون ( $\text{SiO}_2$ ) في الصنف الثالث بشكل واضح والذي يوافق خط الانعراج عند الزاوية  $2\theta = 28.48$  ، ويعتبر  $\text{SiO}_2$  ذو ثابت عزل ضعيف وهذا ما يضعف من قيمة ثابت العزل للصنف الثالث. كما يعود الاختلاف في ثابت العزل إلى اختلاف حجم حبيبات كل صنف كذلك. ما يمكن قوله هو أن تغيرات ثابت العزل لوحده لا تكفي لتفسير الاختلاف الموجود بين منحنيات تغير درجة الحرارة لعناصر التسخين من أجل مختلف أصناف كربيد السليكون الصناعي .

#### IV- 2-2-2 دراسة زاوية فقدان العزلية

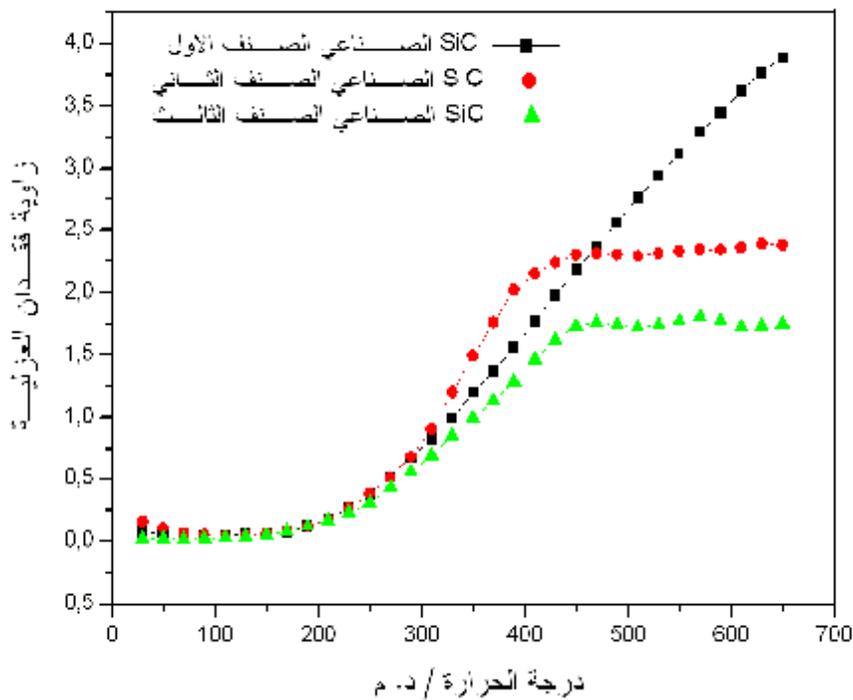
يمثل الشكل IV-3 منحنيات تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة من أجل ثلاث أصناف من كربيد السليكون الصناعي حيث يظهر هذا الشكل أن زاوية فقدان العزلية تكون في حدود 0.158 عند الدرجة 30 م° للصنف الثاني وتكون عند 0.075 و 0.026 للصنفين الأول والثالث على التوالي عند نفس الدرجة ، وترتفع زاوية فقدان العزلية في البداية ببطء مع ارتفاع درجة الحرارة إلى غاية حوالي الدرجة 200 م° أين نلاحظ زيادة سريعة و في جميع الأصناف إلى غاية حوالي الدرجة 400 م° أين تصبح شبه مستقرة في الصنفين الثاني والثالث أما في الصنف الأول فتبقى في تزايد مستمر مع ارتفاع درجة الحرارة. يعود سبب وجود اختلاف في زاوية فقدان العزلية باختلاف أصناف كربيد السليكون الصناعي كذلك، إلى اختلاف درجة نقاوة كل صنف و نوعية الشوائب المتواجدة فيهم و اختلاف حجم حبيبات كل صنف كذلك . حيث أظهرت منحنيات انعراج الأشعة السينية ( الشكل III-7 ) مثلا، وجود عنصر أكسيد السليكون (SiO<sub>2</sub>) في الصنف الثالث بشكل واضح والذي يوافق خط الإنعراج عند الزاوية  $2\theta = 28.48^\circ$  ، ويعتبر SiO<sub>2</sub> ذو زاوية فقدان ضعيفة وهذا ما يضعف من قيمة زاوية الفقدان للصنف الثالث. ما يمكن قوله هو أن تغيرات زاوية فقدان العزلية لا تفسر بشكل واضح الاختلاف الموجود بين منحنيات تغير درجة الحرارة لعناصر التسخين من أجل مختلف أصناف كربيد السليكون الصناعي .

#### IV- 3-2-2 دراسة معامل فقدان العزلية

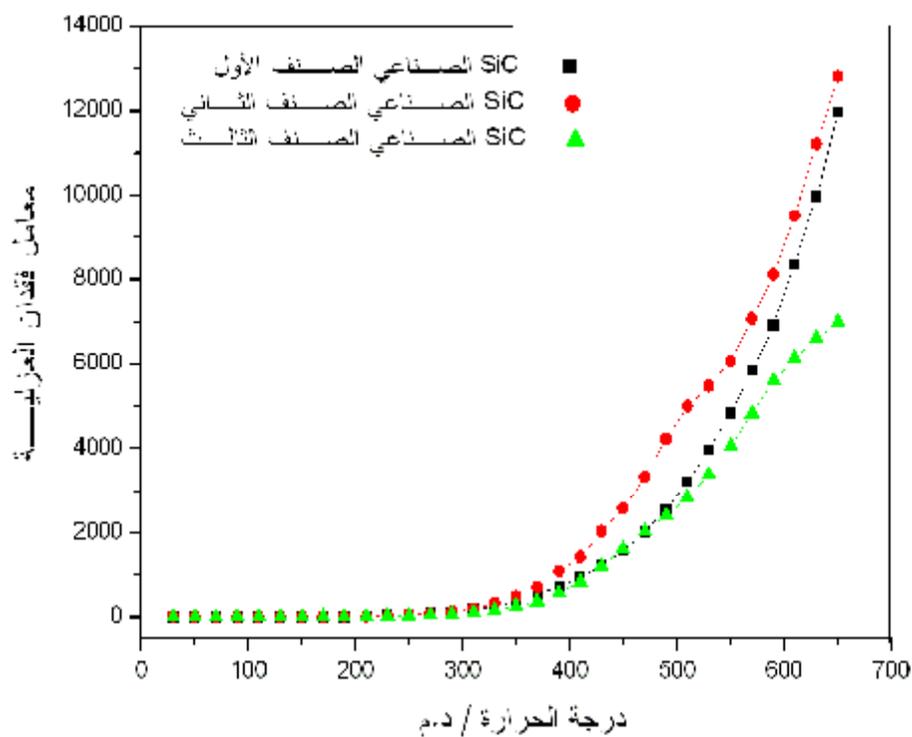
لرسم منحنى تغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة نستعمل العلاقة التالية  $e'' = e' \tan d$  ما يمكن ملاحظته من المنحنى الممثل لتغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة الشكل IV-4 للأصناف الثلاثة هو الارتفاع البطيء لمعامل الفقدان مع درجة الحرارة ولجميع الأصناف إلى غاية حوالي 350 م° للصنف الثاني و 370 م° للصنف الأول والثالث تقريبا أين نلاحظ ارتفاع مفاجئ في قيمته ، تعرف هذه الدرجة التي يحدث فيها هذا التغير المفاجئ بدرجة الحرارة الحرجة  $T_c$  ، وهي الدرجة التي تقترن فيها جزيئات عنصر التسخين بموجات الميكرو بأكثر فاعلية. يرتبط مدى تفاعل كل صنف من كربيد السليكون الصناعي بقيمة معامل الفقدان وبمدى ارتفاعه مع درجة الحرارة حيث تظهر المنحنيات بوضوح الاختلاف الموجود حيث نجد أن معامل الفقدان لكربيد السليكون الصنف الثاني يرتفع بكيفية أسرع مع درجة الحرارة مقارنة بالصنف الأول والثالث ويرتفع في هذا الأخير بصورة أبطئ مقارنة بالصنفين الأولين ، وبمقارنة هذه النتائج بنتائج اختبارات التسخين ، نلاحظ أن هناك تطابق تام بينها. أي أن تغيرات معامل الفقدان مع درجة الحرارة للأصناف الثلاثة تفسر وبطريقة جيدة الإختلاف الموجود بين منحنيات التسخين من أجل مختلف أصناف كربيد السليكون الصناعي الداخلة في صناعة عناصر التسخين.



الشكل IV - 2- تغيرات ثابت العزل النسبي مع درجة الحرارة لثلاثة أصناف من كربيد السليكون الصناعي (1khz).



الشكل IV - 3- تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لثلاثة أصناف من كربيد السليكون الصناعي (1khz).

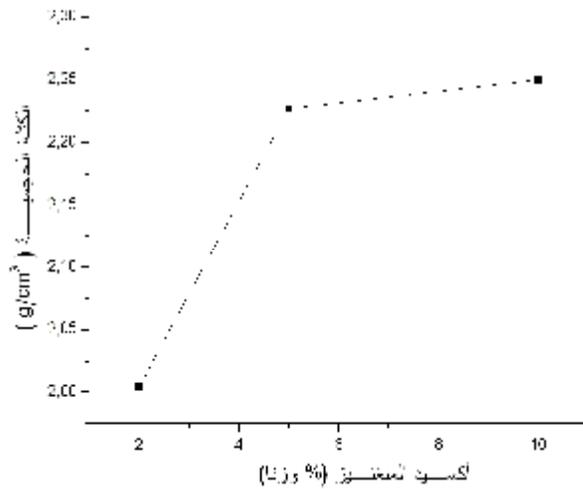


الشكل IV - 4 تغيرات معامل الفقدان العزلي مع درجة الحرارة لثلاثة أصناف من كربيد السليكون الصناعي

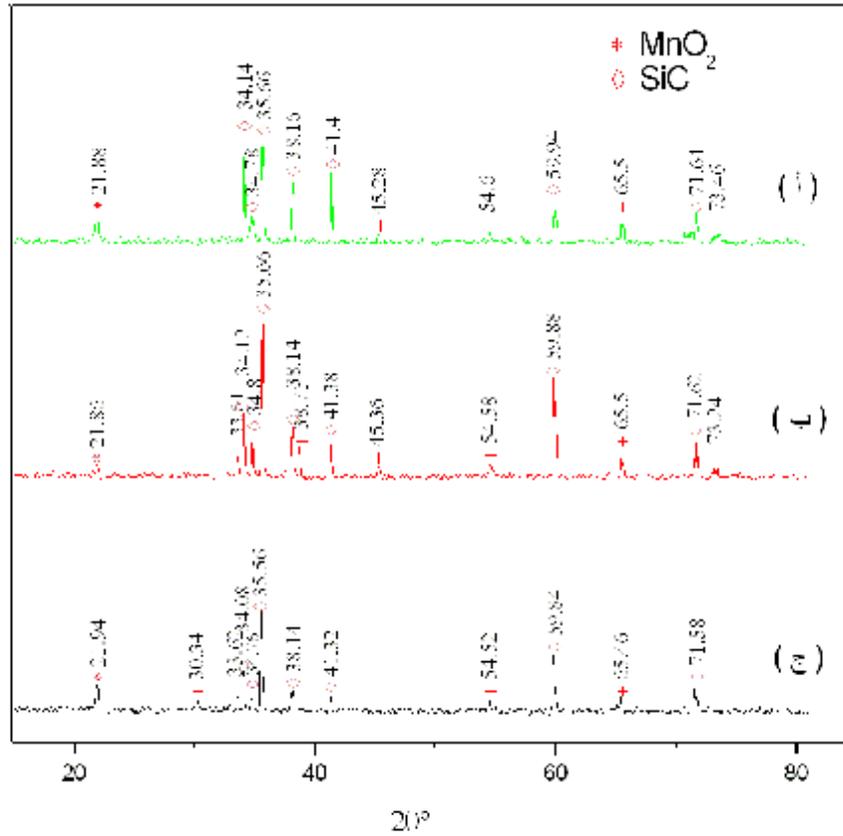
## IV- 3 تأثير الإضافات

IV- 1-3 تأثير إضافة أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) في عملية التسخين

لقد أظهرت عناصر التسخين المصنوعة من الـ SiC الصناعي فقط بعض النقائص والعيوب حتى بالنسبة لأحسنها المصنوع من الصنف الثاني كظهور البقع الساخنة وعدم تجانس التسخين و الانفلات الحراري في بعضها الآخر (الصنف الأول) ، كما أن درجة الحرارة التي إستطاع الوصول إليها بعد 10 دقائق لا تتعدى  $1270^{\circ}C$  بالنسبة للصنف الثاني وهذه الدرجة تبقى شبه ثابتة حتى بزيادة زمن التسخين. هذا ما جعلنا ن فكر في البحث عن مواد كإضافات من أجل تحسين خصائص كبريد السليكون الصناعي الصنف الثاني ومن تم الوصول إلى درجات حرارة أعلى مع تسخين متجانس ومتحكم فيه. لقد وقع اختيارنا على مادة أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) نظرا لكونها لديها خواص عزلية جيدة تناسب المعالجة بموجات الميكرو، مما يجعلها تتفاعل بشكل جيد مع موجات الميكرو. يظهر الشكل IV - 5 تأثير تركيز أكسيد المنغنيز على الكتلة الحجمية الظاهرية للعينات ملبدة عند  $1250^{\circ}C$  بموجات الميكرو لمدة دقيقة واحدة ، حيث نلاحظ أنها ترتفع مع زيادة نسبة أكسيد المنغنيز المضافة حيث ترتفع من  $2.004$  غ / سم<sup>3</sup> عند النسبة 2 % إلى  $2.227$  غ / سم<sup>3</sup> عند النسبة 5 % ثم إلى  $2.25$  غ / سم<sup>3</sup> من أجل 10 % من أكسيد المنغنيز وتعزى هذا الارتفاع في الكتلة الحجمية إلى زيادة كثافة العينات. يظهر الشكل IV - 6 طيف انعراج الأشعة السينية للعينات ( أ ) - 2 % ( ب ) - 5 % ( ج ) - 10 % أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) ملبدة عند  $1250^{\circ}C$  بموجات الميكرو لمدة دقيقة واحدة. نلاحظ أن هناك تحولات طوريه تحدث بزيادة تركيز أكسيد المنغنيز المضاف ، حيث نلاحظ ظهور خطوط انعراج جديدة مع زيادة تركيز ( $MnO_2$ ) المضاف عند  $2\theta = 38.71, 73.24$  وهذا في العينات ذات 5% من  $MnO_2$  وعند  $2\theta = 30.34$  في العينات ذات 10% من  $MnO_2$  ، لم نتمكن من تحديد طبيعة هذه الخطوط بواسطة بطاقات ASTM و JCPDF.



الشكل IV - 5 الكتلة الحجمية لعينات ذات تراكيز مختلفة من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) ملبدة عند  $1250^{\circ}C$  بموجات الميكرو لمدة دقيقة واحدة.



الشكل IV - 6 طيف إنعراج الأشعة السينية لعينات من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسب مختلفة من  $MnO_2$  (أ) 2% (ب) 5% (ج) 10% وملبدة عند 1250 م لمدة دقيقة واحدة بموجات الميكرو

#### IV-1-3-1 اختبارات التسخين

بعد صناعة عناصر التسخين من كربيد السليكون الصناعي (الصنف الثاني) مضاف إليه ثلاث نسب مختلفة من أكسيد المنغنيز (2%، 5% و 10%) يتم وضعها الواحد تلو الآخر في وسط الحجرة داخل نظام العزل الحراري بحيث يكون رأس المزدوج الحراري عند مركز السيسيتور، ويرمج الفرن باستطاعته القصوى ويرمج زمن التسخين بـ 10 دقائق عن طريق لوح التحكم، وتؤخذ درجة الحرارة الابتدائية قبل بدأ الاختبار بعدها يشغل الفرن وتسجل درجة الحرارة كل 10 ثواني والشكل IV-7 يمثل المنحنيات الممثلة لاختبارات التسخين من أجل ثلاثة نسب من الإضافات لأكسيد المنغنيز. إن أول ما يمكن ملاحظته أولاً هو أن عنصر التسخين المصنوع من كربيد السليكون بإضافة 5% من ( $MnO_2$ ) كان الأحسن في اختبارات التسخين حيث استطاع الوصول إلى الدرجة 1483 م خلال 10 دقائق في حين وصلت درجة الحرارة في العنصرين ذي 2% و 10% من ( $MnO_2$ ) إلى 1435 م و 1407 م على التوالي خلال نفس الزمن.

ما يمكن قوله هو أنه رغم الاختلاف في نسب أكسيد المنغنيز المضافة و الداخلة في تكوين عناصر التسخين إلا أنها كلها استطاعت أن تسخن بفاعلية مع تجانس رائع في التسخين وتتجاوز كلها الدرجة 1400 م° في فترة وجيزة نسبياً ( 10 دقائق ) وذلك دون أن نلاحظ وجود تشققات أو بقع دائبة في أية جهة منها . وبالتالي يمكن اعتبار أنها استطاعت اجتياز اختبارات التسخين بنجاح لم تحققه عناصر التسخين المصنوعة من الـ ( SiC ) الصناعي فقط. وبذلك يمكن القول أنه يمكن ضمان تليد جيد ومتجانس للعديد من المواد الخزفية ومعالجة حرارية للعديد من المواد بموجات الميكرو باستعمال هذه العناصر وخاصة عنصر التسخين المصنوع من الـ ( SiC ) الصناعي والمطعم بـ 5 % من ( MnO<sub>2</sub> ) .

مما نلاحظ كذلك من المنحنيات أنه يمكن أن نميز ثلاث مراحل تسخين مختلفة و من أجل مختلف نسب الإضافات من أكسيد المنغنيز والاختلاف الوحيد هو اختلاف سرعة التسخين في كل مرحلة باختلاف تركيز أكسيد المنغنيز المضاف.

**المرحلة الأولى من التسخين :** أول من يبدأ يتفاعل مع موجات الميكرو داخل عناصر التسخين هي جزيئات مادة أكسيد المنغنيز لامتلاكها معامل فقدان عازلية أعلى من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني وبما أنها تحيط بجزيئات الـ SiC الصناعي من كل جانب فهي ترفع من درجة حرارته أكثر مما يرفع من مساهمته في التسخين لتأتي بعد ذلك مساهمة الشوائب الموجودة فيه وكذلك الأطوار المحتمل تشكلها داخل عناصر التسخين . ومدة هذه المرحلة تبدو في حدود دقيقة واحدة أي إلى غاية حوالي الدرجة 300 م° مع اختلاف بسيط بحسب اختلاف نسبة أكسيد المنغنيز الداخلة في صناعة عناصر التسخين.

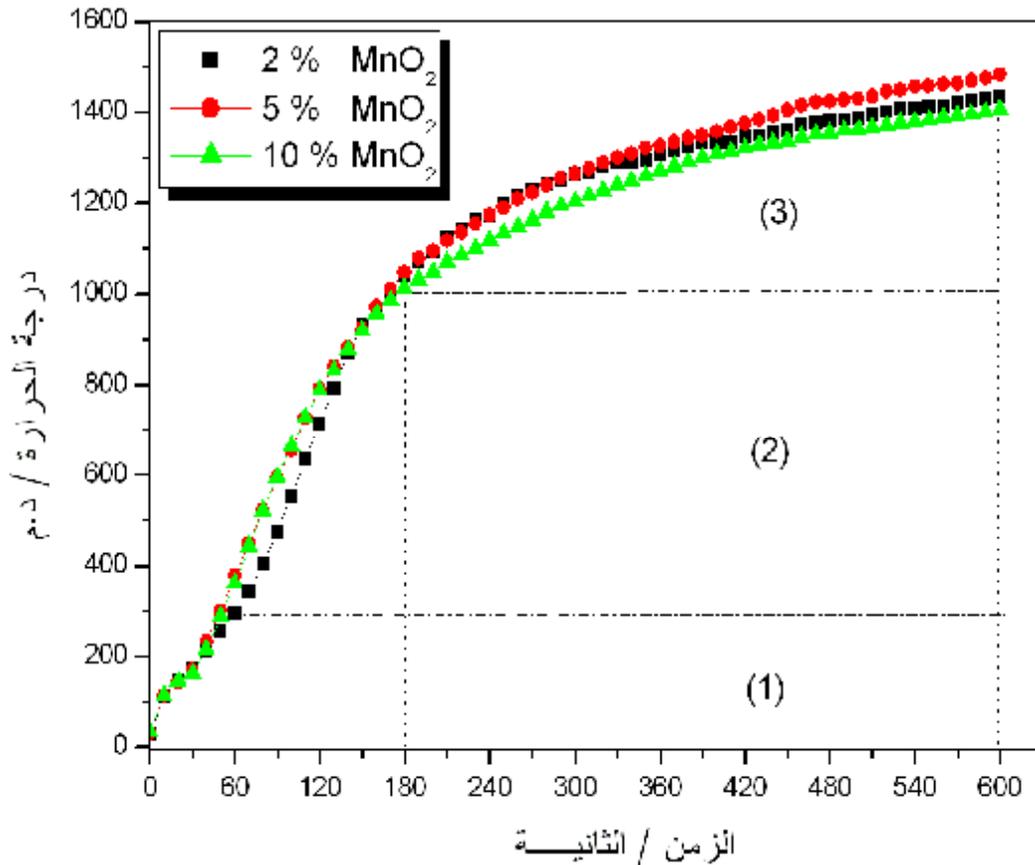
**المرحلة الثانية من التسخين :** مع ارتفاع درجة الحرارة تزيد درجة تفاعل الجزيئات المكونة لعناصر التسخين مع موجات الميكرو وتكون مساهمتها في التسخين بحسب نسبة ارتفاع معاملات فقدانها مع درجة الحرارة. إلى أن تصل كل جملة إلى درجة الحرارة الحرجة لها أين تتزاوج بشكل جيد مع موجات الميكرو وترتفع درجة حرارة عنصر التسخين بصورة سريعة ويمكن تقدير مجال هذه المرحلة ما بين حوالي 300 م° و 1000 م° مع وجود بعض الاختلاف وذلك باختلاف نسبة أكسيد المنغنيز الداخلة في تكوين العناصر بحيث تزيد من أجل العنصر ذو 5 % و 2 % من أكسيد المنغنيز وتكون في حدود هذا المجال من أجل العنصر ذو 10 % من أكسيد المنغنيز.

### المرحلة الثالثة من التسخين :

في المرحلة الأخيرة من التسخين تبدأ سرعة التسخين في التباطؤ ، معلنة عن اقتراب عناصر التسخين من عتبة الامتصاص التي عندها تتوقف جزيئات أكسيد المنغنيز و الـ SiC الصناعي عن امتصاص المزيد من موجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة. لأن كل الجزيئات المكونة لعنصر التسخين تكون قد حولت طاقة موجات الميكرو الواردة إليها ووصلت إلى حد التشبع.

ولتفسير الاختلاف الموجود بين المنحنيات الثلاث بدقة يجب فهم الآلية التي يتم بها تفاعل موجات الميكرو مع عناصر التسخين من أجل كل نسبة من أكسيد المنغنيز مضافة لكربيد السليكون الصناعي ، إن شدة تفاعل موجات الميكرو مع عناصر التسخين الثلاث تتعلق أساسا بالخواص العزلية لكل منها .

تبين المعادلة (1) أن الاستطاعة الممتصة تتناسب خطيا مع معامل الفقدان  $e''$  . ومن هذا يمكن أن يلاحظ أنه يتم الحصول على شدة تسخين مختلفة في عناصر التسخين المصنوعة بإضافة نسب مختلفة من أكسيد المنغنيز بحسب قيمة معامل فقدان العازلية  $e''$  الناتج من أجل كل نسبة مضافة من أكسيد المنغنيز لكربيد السليكون الصناعي في عناصر التسخين . بمعنى كلما كان هذا المعامل كبير في القيمة كلما كان تسخين عنصر التسخين بموجات الميكرو كبير أيضا . ومن منحنيات التسخين لمختلف عناصر التسخين ، يمكن توقع ترتيب قيم معامل الفقدان من مختلف نسب الإضافات حيث يفترض أن تكون الأعلى بالنسبة لعنصر التسخين المصنوع من كربيد السليكون بإضافة 5% من  $MnO_2$  ثم تنخفض في العنصر ذو 2% من  $MnO_2$  لتتخفض أكثر في ذو 10% من  $MnO_2$  . وللتأكد من صحة الفرضية وفهم أسباب تغير المنحنيات ، ندرس الخواص العزلية من أجل مختلف نسب الإضافات من أكسيد المنغنيز في عنصر التسخين.



الشكل IV - 7 منحنيات التسخين من أجل نسب مختلفة من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) مضافة في عناصر التسخين

#### IV- 2-1-3 دراسة الخواص العزلية

##### IV- 1-2-1-3 دراسة ثابت العزل

إن تغير ثابت العزل النسبي مع درجة الحرارة للتراكيز المحصورة ما بين 2 و 10 % وزنا من أكسيد المنغنيز موضحة في الشكل IV-8 هذا الأخير يبين أن الإضافات لها تأثير على ثابت العزل النسبي فعند إضافة 5 % من أكسيد المنغنيز يرتفع ثابت العزل النسبي من حوالي 135 بالنسبة لـ SiC الصناعي فقط إلى حوالي 1820 عند الدرجة 30 °م متزايدا مع تزايد تركيز أكسيد المنغنيز من 2 إلى 5 % لكن عند النسبة 10 % ينخفض ثابت العزل من جديد إلى حوالي 1250 عند الدرجة 30 °م وقد يعزى هذا الانخفاض إلى ظهور أطوار جديدة عند الزيادة لأكثر من 5 % لتركيز أكسيد المنغنيز حيث لاحظنا من منحنيات إنعراج الأشعة السينية في الشكل IV-6 ظهور خط جديد عند الزاوية  $2\theta = 30.34^\circ$  في العينات ذات التركيز 10 % من أكسيد المنغنيز لم تتمكن من تحديده بواسطة بطاقات ASTM و JCPDF. ما نلاحظه كذلك هو أن ثابت العزل النسبي يتزايد مع ارتفاع درجة الحرارة بشكل بطيء نوعا ما في البداية حتى حوالي الدرجة 350 °م لجميع التراكيز تقريبا ثم بعد ذلك يتزايد بشكل سريع مع الاختلاف في نسبة التزايد ، بحيث تكون بشكل أسرع في العينات ذات التركيز 5 % من  $MnO_2$  وبدرجة أقل في العينات ذات التركيز 10 % و 2 % من  $MnO_2$ . ما يمكن قوله هو أن تغيرات ثابت العزل لوحده لا تفسر الاختلاف الموجود بين منحنيات تغير درجة الحرارة لعناصر التسخين من أجل كل نسبة من أكسيد المنغنيز مضافة لكربيد السليكون الصناعي.

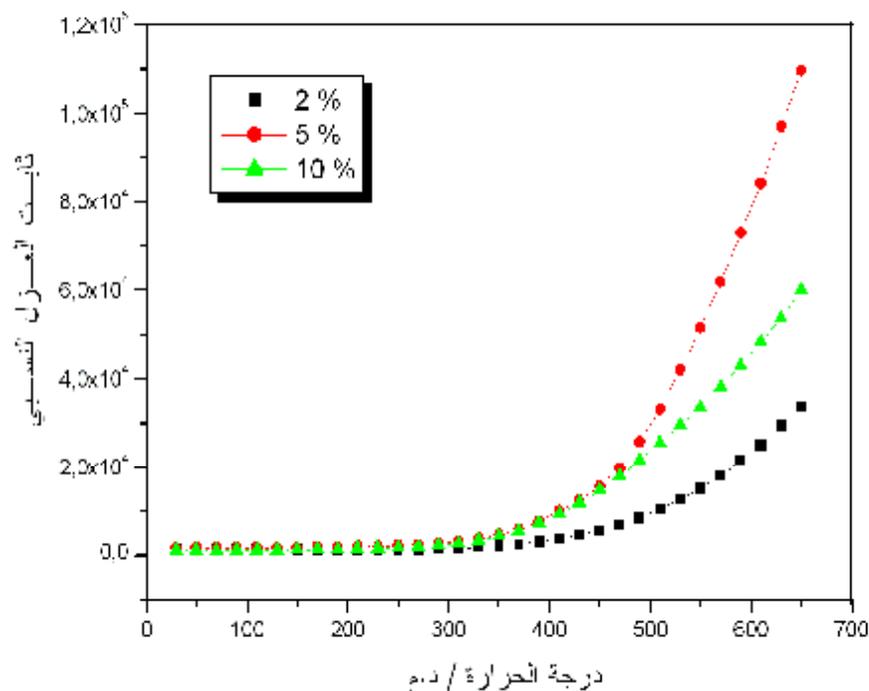
##### IV- 2-2-1-3 دراسة زاوية فقدان العزلية

يمثل الشكل IV-9 تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لكربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه تراكيز 2 ، 5 و 10 % من أكسيد المنغنيز حيث يظهر هذا الشكل أن زاوية فقدان العزلية تكون في حدود 3.63 عند الدرجة 30 °م للعينات ذات التركيز 2 % من  $MnO_2$  وهي قيمة مرتفعة نسبيا. لكن مع الزيادة في نسبة الإضافات فإن قيمتها تتناقص بزيادة التركيز ، نلاحظ أن زاوية فقدان العزلية ترتفع مع ارتفاع درجة الحرارة بشكل بطيء نوعا ما في البداية ثم ترتفع بشكل سريع إلى غاية حوالي الدرجة 350 °م للعينات ذات 2 و 10 % والدرجة 370 °م للتركيز 5 % أين تأخذ في الانخفاض ، بحيث يكون انخفاض طفيف في العينات ذات 10 % من  $MnO_2$  إلى غاية الدرجة 430 °م ثم تعاود الارتفاع من جديد ، أما في العينات ذات 2 و 5 % من  $MnO_2$  فتتخفف بشكل معتبر نوعا ما إلى غاية الدرجة 610 °م أين تعاود الارتفاع من جديد بارتفاع درجة الحرارة. إن انخفاض زاوية فقدان العزلية بزيادة تركيز أكسيد المنغنيز قد يعزى بشكل أساسي إلى ارتفاع الكثافة في العينات ( انخفاض الفراغات ) حيث أن الكتلة الحجمية الظاهرية وجدنا أنها تتزايد بزيادة تركيز  $MnO_2$  المضاف ، هذا الانخفاض في نسبة الفراغات قد ينتج

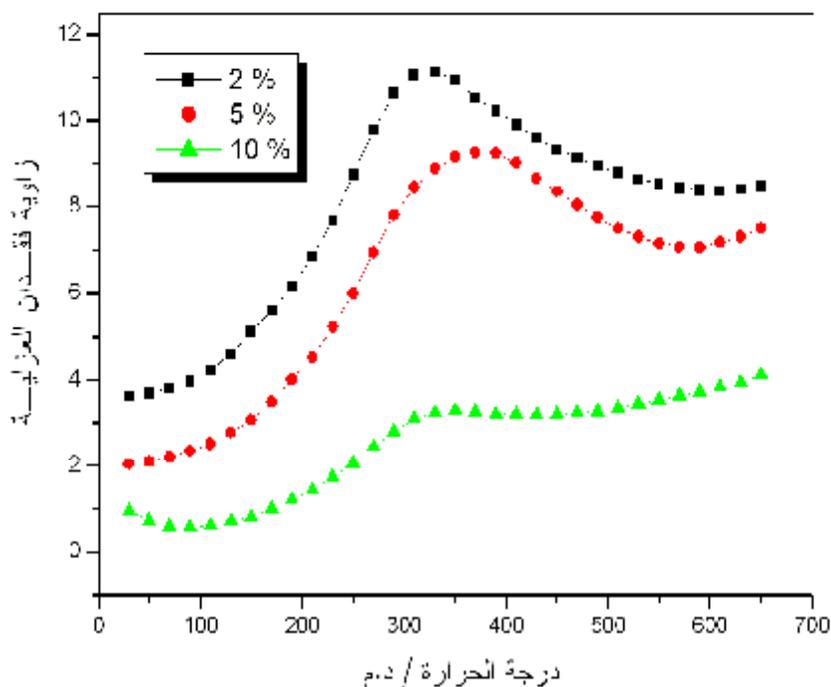
عن ظهور طور سائل ، فزيادة التركيز يعني زيادة كمية الطور السائل الموجودة مع جسيمات الحالة الصلبة والتي تكون كافية لملء التجاويف في العينات الملبدة مما يؤدي إلى تكثيف أكبر.

#### IV-3-1-3-2 دراسة معامل فقدان العزلية

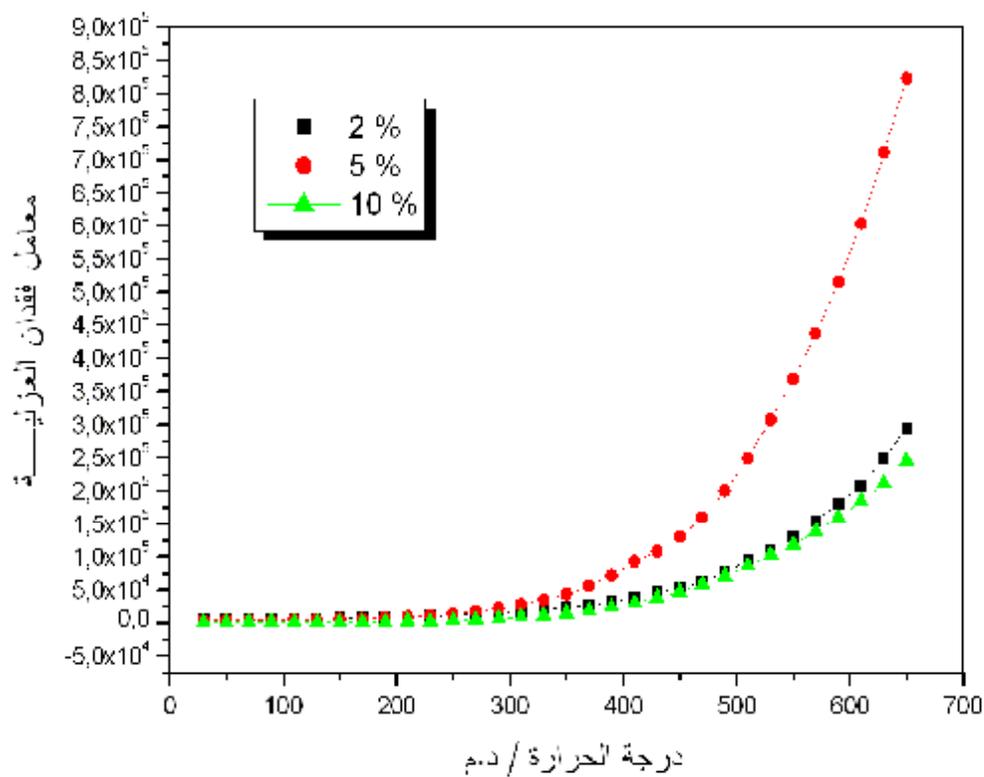
لرسم منحنى تغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة نستعمل العلاقة التالية  $e'' = e' \tan d$  ما يمكن ملاحظته من المنحنى الممثل لتغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة (الشكل IV - 10) ، من أجل مختلف نسب  $MnO_2$  المضافة هو الارتفاع البطيء لمعامل الفقدان مع درجة الحرارة ولجميع التراكيز إلى غاية حوالي  $350^\circ C$  العينات ذات التركيز 5 % من  $MnO_2$  و  $370^\circ C$  في العينات ذات 2 % و 10 % تقريباً، أين نلاحظ بعد ذلك ارتفاع مفاجئ في قيمته ، تعرف هذه الدرجة التي يحدث فيها هذا التغير المفاجئ كما سبق الإشارة إليه بدرجة الحرارة الحرجة  $T_c$  ، وهي الدرجة التي تقترب فيها جزيئات المواد المكونة لعنصر التسخين بموجات الميكرو بأكثر فاعلية. يرتبط مدى تفاعل كل عنصر تسخين بمدى تأثير كل نسبة إضافة من أكسيد المنغنيز في قيمة معامل الفقدان العازلي ومدى ارتفاعه مع درجة الحرارة حيث تظهر المنحنيات بوضوح الاختلاف الموجود حيث نجد أن معامل الفقدان في العينات ذات التركيز 5 % من  $MnO_2$  يرتفع بكيفية أسرع مع درجة الحرارة مقارنة بالعينات ذات التركيز 2 % و 10 % ويرتفع في هذه الأخيرة بصورة أبطئ مقارنة بالتركيزين الأولين ، وبمقارنة هذه النتائج بنتائج اختبارات التسخين ، نلاحظ أن هناك تطابق تام بينها. أي أن تغيرات معامل الفقدان مع درجة الحرارة للتركيز الثلاثة من أكسيد المنغنيز تفسر وبطريقة جيدة الاختلاف الموجود بين منحنيات التسخين من أجل مختلف نسب الإضافات من  $MnO_2$  الداخلة في صناعة عناصر التسخين.



الشكل IV - 8 تغيرات ثابت العزل مع درجة الحرارة من أجل عينات ذات تراكيز مختلفة من أكسيد المنغنيز (MnO<sub>2</sub>) مضافة إلى الـ SiC الصناعي الصنف الثاني (1khz).



الشكل IV - 9 تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة من أجل عينات ذات تراكيز مختلفة من أكسيد المنغنيز (MnO<sub>2</sub>) مضافة إلى الـ SiC الصناعي الصنف الثاني (1khz).



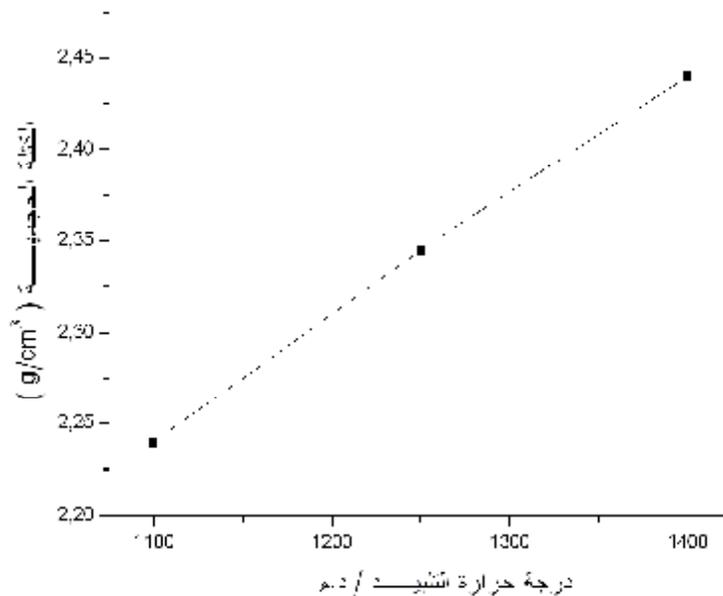
الشكل IV - 10 تغيرات معامل فقدان العزلي مع درجة الحرارة من أجل عينات ذات تراكيز مختلفة من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) مضافة إلى الـ SiC الصناعي الصنف الثاني

#### IV- 4 دراسة تأثير درجة حرارة تلييد عناصر التسخين في تسخينه

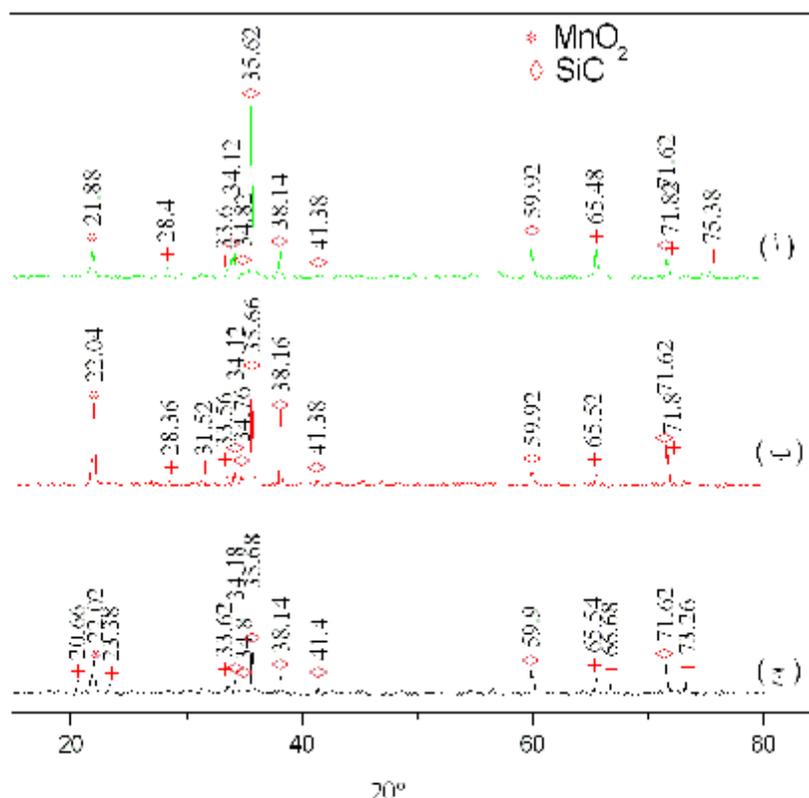
لدراسة تأثير درجة حرارة تلييد عناصر التسخين في تسخين هذه الأخيرة قمنا بتحضير ثلاث عناصر تسخين مركبة من كربيد السليكون ( الصنف الثاني ) مضاف إليه 5 % وزنا من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) وملبدة عند ثلاث درجات مختلفة ( 1100، 1250 و 1400 م° ) لمدة ساعتين . اختيارنا لـ 5% ( $MnO_2$ ) كإضافة كان لأنها كانت الأحسن في اختبارات التسخين (الشكل IV -7).

يظهر المنحنى الموضح في الشكل IV- 11 تأثير درجة حرارة التلييد على الكتلة الحجمية الظاهرية للعينات حيث نلاحظ أنها ترتفع مع زيادة درجة حرارة التلييد حيث ترتفع من 2.24 غ / سم<sup>3</sup> عند الدرجة 1100 م° إلى 2.345 غ / سم<sup>3</sup> عند الدرجة 1250 م° ثم إلى 2.44 غ / سم<sup>3</sup> من أجل الدرجة 1400 م°

يظهر الشكل IV - 12 طيف انعراج الأشعة السينية لعينات من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند درجات حرارة مختلفة. حيث نلاحظ أنه مع زيادة درجة حرارة التلييد هناك تحولات طوريه تحدث ، حيث لاحظنا ظهور خطوط انعراج جديدة فمثلا عند الدرجة 1250 م° لاحظنا ظهور خط عند الزاوية  $2\theta = 31.52$  أما عند الدرجة 1400 م° فلاحظنا ظهور أربعة خطوط جديدة عند  $20.66$  ,  $23.38$  ,  $66.68$  ,  $73.26$  ،  $2\theta = 20.66$  لم نتمكن من تحديد طبيعة هذه الخطوط بواسطة بطاقات ASTM و JCPDF.



الشكل IV - 11 الكتلة الحجمية لعينات من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين.



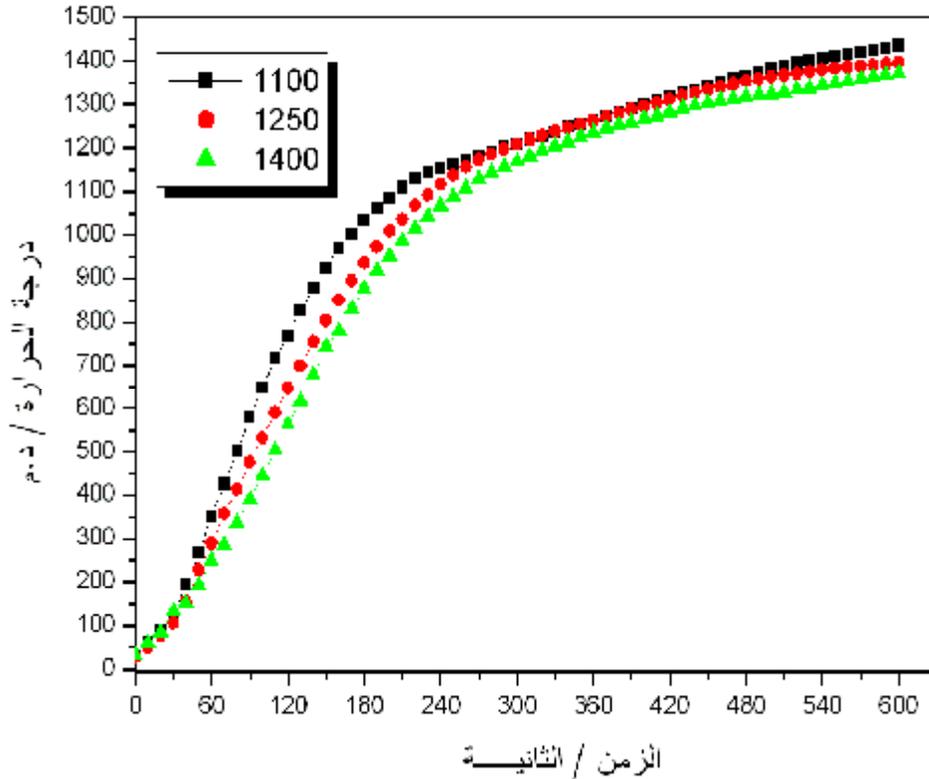
الشكل IV - 12 طيف إنعراج الأشعة السينية لعينات من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند ( أ ) 1100 م° ( ب ) 1250 م° ( ج ) 1400 م° لمدة ساعتين.

#### 1-4-IV اختبارات التسخين

أجريت اختبارات التسخين كما سبق الإشارة إليه على ثلاث عناصر تسخين مصنوعة من كربيد السليكون الصناعي ( الصنف الثاني ) مضاف إليه 5% من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) والملبدة عند ثلاث درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين ( 1100 م° ، 1250 م° ، 1400 م° ) في فرن تقليدي ، يتم وضعها الواحد تلو الآخر في وسط الحجر داخل نظام العزل الحراري بحيث يكون رأس المزدوج الحراري عند مركز عنصر التسخين ، بيرمج الفرن باستطاعته القصوى ويبرمج زمن التسخين بـ 10 دقائق عن طريق لوح التحكم ، وتؤخذ درجة الحرارة الابتدائية قبل بدأ الاختبار. بعدها يشغل الفرن وتسجل درجة الحرارة كل 10 ثواني والشكل IV-13 يمثل المنحنى الممثل لاختبار التسخين للثلاثة عناصر الملبدة عند درجات حرارة مختلفة.

ما يمكن ملاحظته من منحنيات التسخين من أجل مختلف درجات حرارة التلييد، أن درجة حرارة التسخين كانت الأعلى من أجل العنصر الملبد عند الدرجة 1100 م° وتتناقص بزيادة درجة حرارة التلييد أي أن درجة حرارة التسخين تتناسب عكسيا مع درجة حرارة التلييد لعناصر التسخين وهذا يعني أنه كلما كانت كثافة

عناصر التسخين أقل كلما كان التسخين بموجات الميكرو لهذه الأخيرة أحسن. أي أن موجات الميكرو تتزاوج بشكل أفضل مع العناصر ذات الكثافة المنخفضة. يعزى الاختلاف بين منحنيات التسخين باختلاف درجة حرارة تلييد عناصر التسخين إلى اختلاف الخواص العزلية لكل واحد منها، أي أن المعالجة الحرارية لعناصر التسخين في درجات حرارة مختلفة تؤدي إلى اختلاف في خواصها العزلية أي اختلاف في معامل الفقدان ويمكن القول أن الرفع من درجة حرارة التلييد لعناصر التسخين قد أدت إلى خفض معامل الفقدان العزلي في عناصر التسخين أي أن الزيادة في كثافة عنصر التسخين تخفض من معامل الفقدان وبالتالي تخفض من درجة تفاعل عناصر التسخين ذات الكثافة الأعلى مع موجات الميكرو. وللتأكد من هذه الفرضية ندرس الخواص العزلية من أجل درجات مختلفة لتلييد عناصر التسخين. يمكن أن نميز كذلك في كل منحنى من منحنيات التسخين في الشكل IV-13 ثلاث مراحل تسخين مختلفة ويمكن تفسيرها بنفس طريقة تفسير المنحنيات الممثلة للتسخين في عناصر التسخين بها نسب مختلفة من أكسيد المنغنيز مضافة (الشكل IV-7) ، أي أن أساس التغير الملاحظ في منحنى التسخين هو التغير الحاصل في معامل الفقدان مع ارتفاع درجة الحرارة داخل عناصر التسخين وهذا للمرحلتين الأولى والثانية أما المرحلة الثالثة والأخيرة من التسخين فيمكن تفسيرها باقتراب عنصر التسخين من عتبة الامتصاص التي عندها تتوقف جزيئات عنصر التسخين عن امتصاص مزيد من استطاعة موجات الميكرو.



الشكل IV - 13 منحنيات التسخين من أجل كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند ( أ ) 1100 م ( ب ) 1250 م ( ج ) 1400 م لمدة ساعتين.

**IV- 2-4 دراسة الخواص العزلية****IV- 1-2-4 دراسة ثابت العزل**

يظهر الشكل IV- 14 المنحنيات الممثلة لثابت العزل النسبي لعينات من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليها 5 % من أكسيد المنغنيز والملبدة عند درجات الحرارة 1100 و 1250 و 1400 لمدة ساعتين. تظهر النتائج أن زيادة درجة حرارة التليد تنقص من ثابت العزل النسبي حيث تظهر النتائج أن ثابت العزل ينخفض من حوالي 1670 في العينات الملبدة عند 1100 م° إلى حوالي 1580 في العينات الملبدة عند 1250 م° لينخفض إلى حوالي 1310 في العينات الملبدة عند 1400 م° وهذا عند الدرجة 30 م°. قد يعود سبب هذا الانخفاض إلى ظهور أطوار جديدة عند الرفع من درجة حرارة التليد حيث يبين طيف انعراج الأشعة السينية ظهور خطوط جديدة في العينات الملبدة عند 1250 م° وظهور أخرى جديدة في العينات الملبدة عند 1400 م° ، لم تتمكن من تحديد هذه الأطوار الجديدة بواسطة بطاقات ASTM و JCPDF. كما قد يعود الانخفاض إلى تغير حجم الحبيبات مع زيادة الحرارة المقدمة للتليد. ما نلاحظه كذلك هو أن ثابت العزل النسبي يتزايد بشكل بطيء نوعا ما في البداية حتى حوالي الدرجة 370 م° لجميع العينات تقريبا ثم بعد ذلك يتزايد بشكل سريع مع الاختلاف في نسبة التزايد ، بحيث تكون بشكل أسرع في العينات الملبدة عند الدرجة 1100 م° وبدرجة أقل في العينات الملبدة عند 1250 م° و 1400 م° . ما يمكن قوله أن ثابت العزل النسبي يمكن أن يفسر نسبيا الاختلاف الموجود بين منحنيات التسخين من أجل درجات تليد مختلفة لعنصر التسخين.

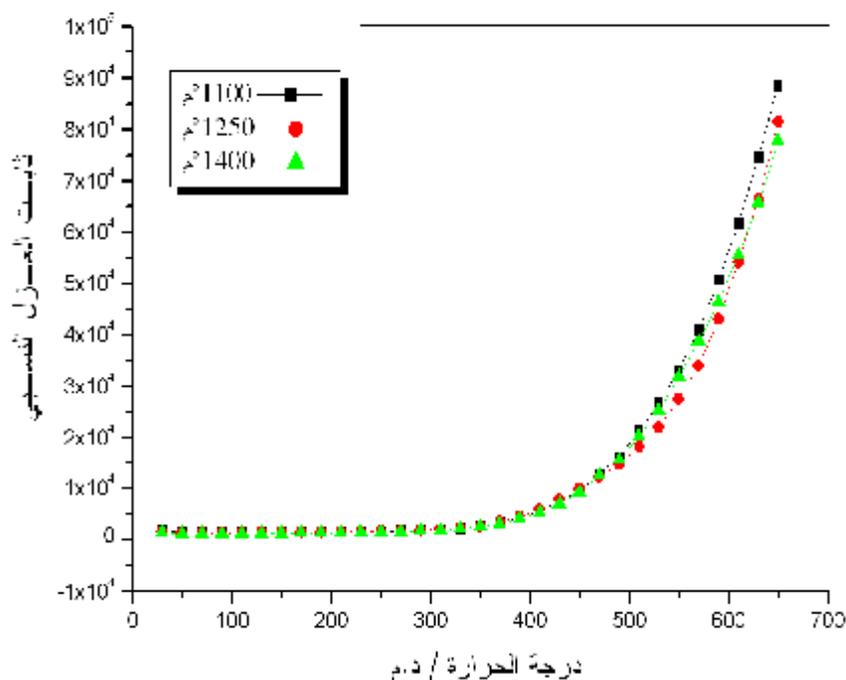
**IV- 2-2-4 دراسة زاوية فقدان العزلية**

يمثل الشكل IV- 15 تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لعينات من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه 5 % من أكسيد المنغنيز ملبدة عند درجات حرارة مختلفة حيث يظهر هذا الشكل أن زاوية فقدان العزلية تكون في حدود 1.27 عند الدرجة 30 م° للعينات الملبدة عند 1100 م° لكن مع الزيادة في درجة حرارة التليد تنخفض قيمة زاوية فقدان العزلية إلى 0.943 للعينات الملبدة عند 1250 م° لتتخفض أكثر في العينات الملبدة عند الدرجة 1400 م° إلى 0.792 وهذا عند نفس درجة الحرارة. نلاحظ أن زاوية فقدان العزلية ترتفع بشكل بطيء مستقر نسبيا إلى غاية حوالي الدرجة 170 م° ارتفاع فنلاحظ زيادة سريعة إلى غاية حوالي الدرجة 390 م° لتعاود الانخفاض من جديد وهذا في جميع العينات ومع وجود اختلاف درجة التزايد والانخفاض . حيث تتزايد بكيفية سريعة في العينات الملبدة عند الدرجة 1100 م° و 1250 م° وبدرجة أقل في العينات الملبدة عند 1400 م° . وتبلغ أعلى قيمة في العينات الملبدة عند الدرجة 1100 م° وهذا عند حوالي الدرجة 390 م° إن انخفاض زاوية فقدان العزلية بزيادة درجة حرارة التليد تعود إلى ارتفاع الكثافة في العينات ( انخفاض الفراغات ) حيث أن الكتلة الحجمية الظاهرية وجدنا أنها تتزايد

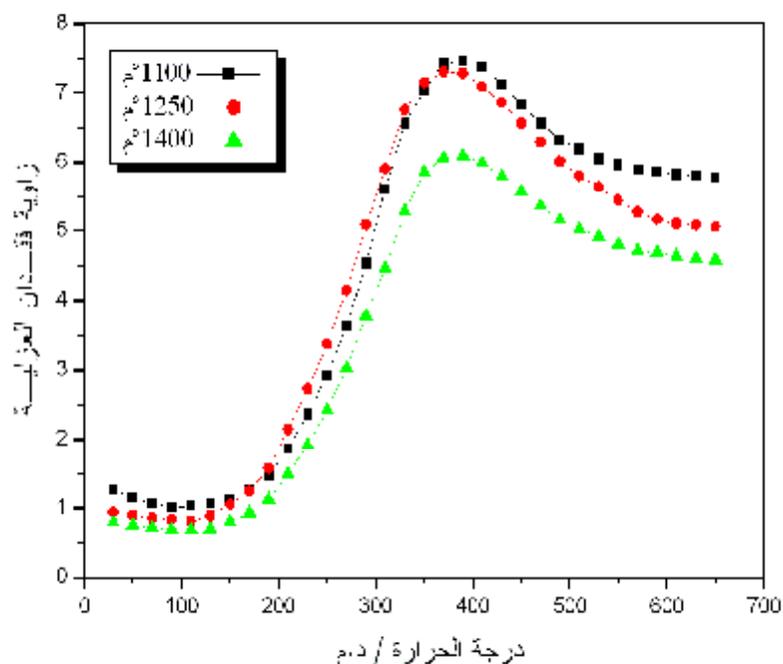
بزيادة درجة حرارة التلييد. ما يمكن قوله هنا كذلك أن تغيرات زاوية فقدان العزلية لمختلف العينات الملبدة عند درجات حرارة مختلفة يمكن أن تفسر الاختلاف الموجود بين منحنيات التسخين من أجل درجات تلييد مختلفة لعنصر التسخين .

#### IV- 3-2-4 دراسة معامل فقدان العزلية

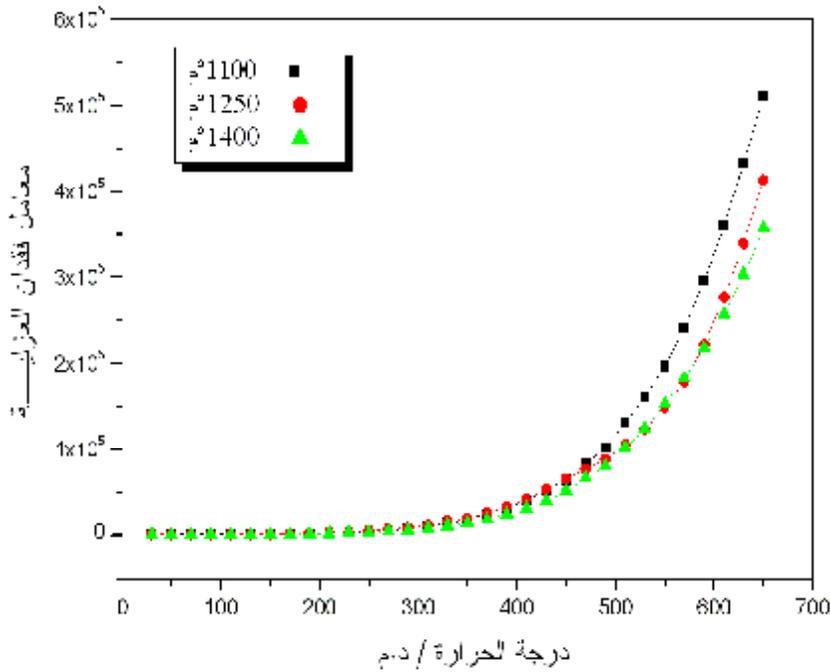
لرسم منحنى تغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة نستعمل العلاقة التالية  $e'' = e' \tan d$  ما يمكن ملاحظته من المنحنى الممثل لتغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة ( الشكل IV - 16 ) هو الارتفاع البطيء لمعامل الفقدان مع درجة الحرارة ولجميع العينات باختلاف درجات حرارة التلييد لها إلى غاية حوالي 350 °م ومن أجل كل العينات الملبدة عند درجات حرارة مختلفة تقريبا أين نلاحظ بعد ذلك ارتفاع مفاجئ في قيمته ، تعرف هذه الدرجة التي يحدث فيها هذا التغير المفاجئ كما سبق الإشارة إليه بدرجة الحرارة الحرجة  $T_c$  ، و بدءا من هذه الدرجة تفتقرن جزئيات عناصر التسخين وباختلاف درجة تلييدها بموجات الميكرو بأكثر فاعلية. يرتبط مدى تفاعل كل عنصر تسخين بقيمة معامل الفقدان وبمدى ارتفاعه مع درجة الحرارة حيث تظهر المنحنيات بوضوح الاختلاف الموجود حيث نجد أن معامل الفقدان من أجل العناصر الملبدة عند 1100 °م يرتفع بكيفية أسرع مع درجة الحرارة مقارنة بالعناصر الملبدة عند الدرجة 1250 °م و 1400 °م ويرتفع في هذا الأخير بصورة أبطئ مقارنة بالعنصرين الأولين ، وبمقارنة هذه النتائج بنتائج اختبارات التسخين ، نلاحظ أن هناك تطابق تام بينها. أي أن تغيرات معامل الفقدان مع درجة الحرارة من أجل عينات لكربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند درجات حرارة مختلفة تفسر وبطريقة جيدة الاختلاف الموجود بين منحنيات التسخين من أجل مختلف عناصر التسخين الملبدة عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل IV - 14 تغيرات ثابت العزل مع درجة الحرارة لعينات الـ SiC الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين (1khz).



الشكل IV - 15 تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لعينات الـ SiC الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين (1khz).



الشكل IV - 16 تغيرات معامل الفقدان العزلي مع درجة الحرارة لعينات كربيد السليكون (SiC) الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه نسبة 5% من  $MnO_2$  وملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين.

#### IV-3-4 دراسة الخواص العزلية لكربيد السليكون (SiC) المخبري الملبد عند درجات حرارة مختلفة

قمنا بدراسة الخواص العزلية لكربيد السليكون المخبري النقي والملبد عند ثلاث درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين (1100 و 1250 و 1400 م°) وهذا لكي نرى تأثير الكثافة في غياب أي احتمال لظهور أطوار جديدة.

#### IV-1-3-4 دراسة ثابت العزل

يظهر الشكل IV - 17 ، المنحنيات الممثلة لثابت العزل النسبي، لعينات من كربيد السليكون المخبري والملبدة عند درجات الحرارة 1100 و 1250 و 1400 م° لمدة ساعتين. تظهر النتائج، أن زيادة درجة حرارة التليد، تنقص من ثابت العزل النسبي. حيث تظهر النتائج، أن ثابت العزل ينخفض من حوالي 234 في العينات الملبدة عند 1100 م° إلى حوالي 217 في العينات الملبدة عند 1250 م°. لينخفض إلى حوالي 215 في العينات الملبدة عند 1400 م° وهذا عند الدرجة 30 م°. قد يعود سبب الانخفاض في ثابت العزل عند زيادة درجة حرارة التليد، أساسا إلى تغير حجم الحبيبات في العينات مع زيادة الحرارة المقدمة للتليد. ما نلاحظه كذلك ، هو أن ثابت العزل النسبي يتزايد بشكل بطيء نوعا ما في البداية ، حتى حوالي الدرجة 450 م° من أجل جميع درجات حرارة

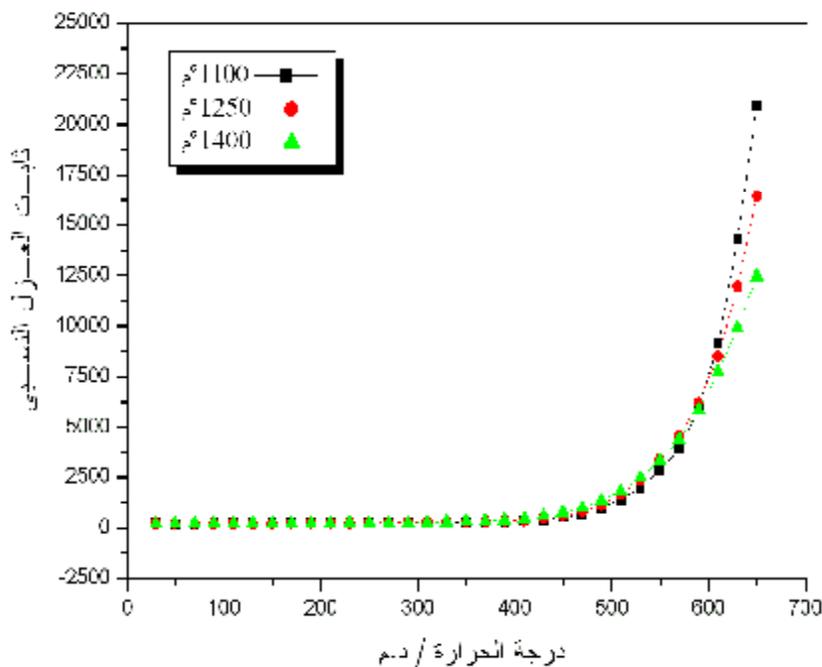
التليبد تقريبا ثم يتزايد بشكل سريع مع الاختلاف في نسبة التزايد ، بحيث تكون بشكل أسرع في العينات الملبدة عند 1100 م° وتنقص مع ارتفاع درجة حرارة التليبد .

#### IV- 2-3-4 دراسة زاوية فقدان العزلية

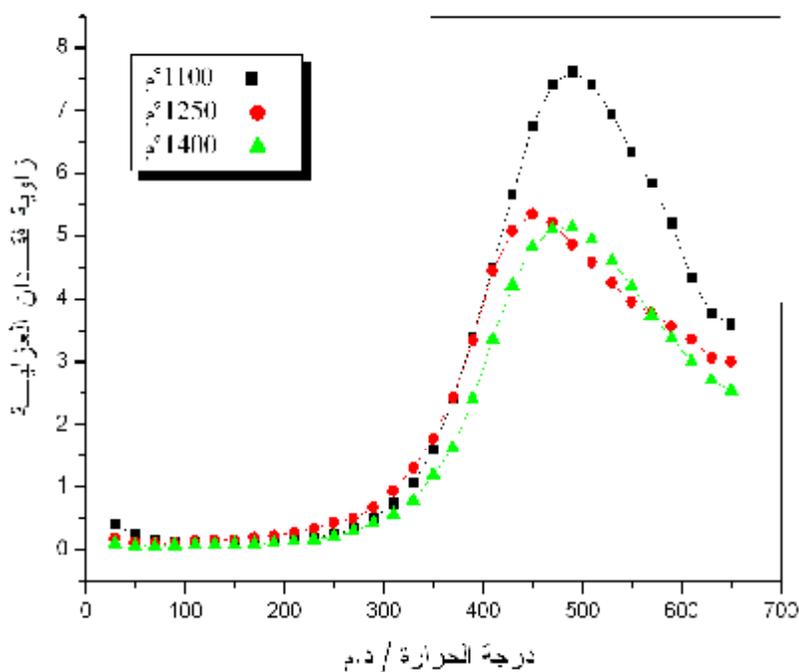
يمثل الشكل IV - 18 تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لعينات من كربيد السليكون المخبري ملبدة عند درجات حرارة مختلفة حيث يظهر هذا الشكل أن زاوية فقدان العزلية تكون في حدود 0.4 عند الدرجة 30 م° للعينات الملبدة عند 1100 م° . لكن مع الزيادة في درجة حرارة التليبد تنخفض قيمة زاوية فقدان العزلية حيث تنخفض إلى حوالي 0.185 في العينات الملبدة عند 1250 م° لتتخفض أكثر إلى حوالي 0.101 في العينات الملبدة عند 1400 م° . نلاحظ أن زاوية فقدان العزلية ترتفع بشكل بطيء نسبيا ، أما عند ارتفاع درجة الحرارة إلى حوالي 300 م° فنلاحظ زيادة سريعة إلى غاية حوالي 490 م° للعينات الملبدة عند 1100 م° و 1400 م° و 450 م° للعينات الملبدة عند 1250 م° أين تأخذ في الإنخفاض من جديد . إن انخفاض زاوية فقدان العزلية بزيادة درجة حرارة التليبد تعود إلى ارتفاع الكثافة في العينات ( انخفاض الفراغات ) حيث أننا وجدنا نسبة التليبد تتزايد بزيادة درجة حرارة التليبد حيث كانت في العينة الملبدة عند 1100 م° حوالي 67 % وعند العينة الملبدة عند 1250 م° كانت حوالي 72 % أما في العينة الملبدة عند الدرجة 1400 م° فكانت حوالي 76 % .

#### IV- 3-3-4 دراسة معامل فقدان العزلية

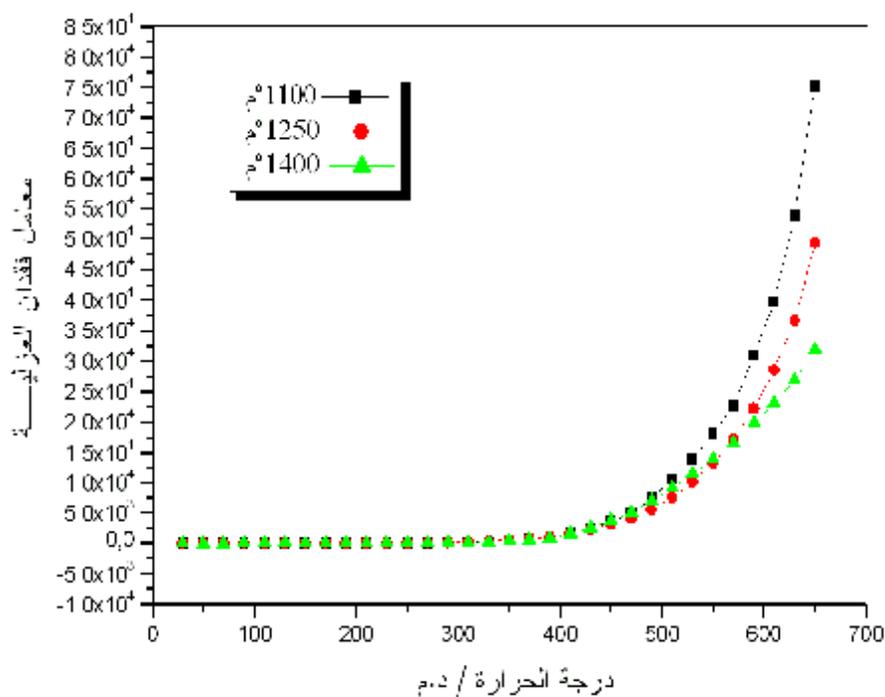
لرسم منحنى تغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة نستعمل العلاقة التالية  $e'' = e' \tan d$  ما يمكن ملاحظته من المنحنى الممثل لتغير معامل فقدان العزلية مع درجة الحرارة هو الارتفاع البطيء لمعامل فقدان مع درجة الحرارة ولجميع العينات باختلاف درجات حرارة التليبد لها إلى غاية حوالي 430 م° ومن أجل كل العينات الملبدة عند درجات حرارة مختلفة تقريبا أين نلاحظ بعد ذلك ارتفاع مفاجئ في قيمته ، يمكن تحديد درجة الحرارة الحرجة  $T_c$  لكربيد السليكون المخبري أنها بالتقريب عند 430 م° ، و بدءا من هذه الدرجة تقترن جزئيات عناصر التسخين لكربيد السليكون وباختلاف درجة تليبدها بموجات الميكرو بأكثر فاعلية. يرتبط مدى تفاعل كل عنصر تسخين بقيمة معامل الفقدان وبمدى ارتفاعه مع درجة الحرارة حيث تظهر المنحنيات بوضوح الاختلاف الموجود حيث نجد أن معامل الفقدان من أجل العناصر الملبدة عند 1100 م° يرتفع بكيفية أسرع مع درجة الحرارة مقارنة بالعناصر الملبدة عند الدرجة 1250 م° و 1400 م° ويرتفع في هذا الأخير بصورة أبطئ مقارنة بالعنصرين الأولين ، ما يمكن قوله أنه يمكننا ومن خلال منحنى تغير معامل الفقدان مع درجة الحرارة توقع تسخين عناصر التسخين المصنوعة من كربيد السليكون المخبري والملبدة عند الثلاثة درجات حرارة . حيث يتوقع أن يسخن عنصر التسخين الملبد عند الدرجة 1100 م° بكيفية أفضل من العناصر الملبدة عند 1250 م° و 1400 م° .



الشكل IV - 17 تغيرات ثابت العزل مع درجة الحرارة لعينات كربيد السليكون (SiC) المخبري ملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين (1khz) .



الشكل IV - 18 تغيرات زاوية فقدان العزلية مع درجة الحرارة لعينات كربيد السليكون (SiC) المخبري ملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين (1khz) .



الشكل IV - 19 تغيرات معامل الفقدان العزلي مع درجة الحرارة لعينات كربيد السليكون (SiC) المخبري ملبدة عند درجات حرارة مختلفة لمدة ساعتين.

#### IV-5 دراسة تأثير تصميم نظام العزل الحراري في التسخين بموجات الميكرو

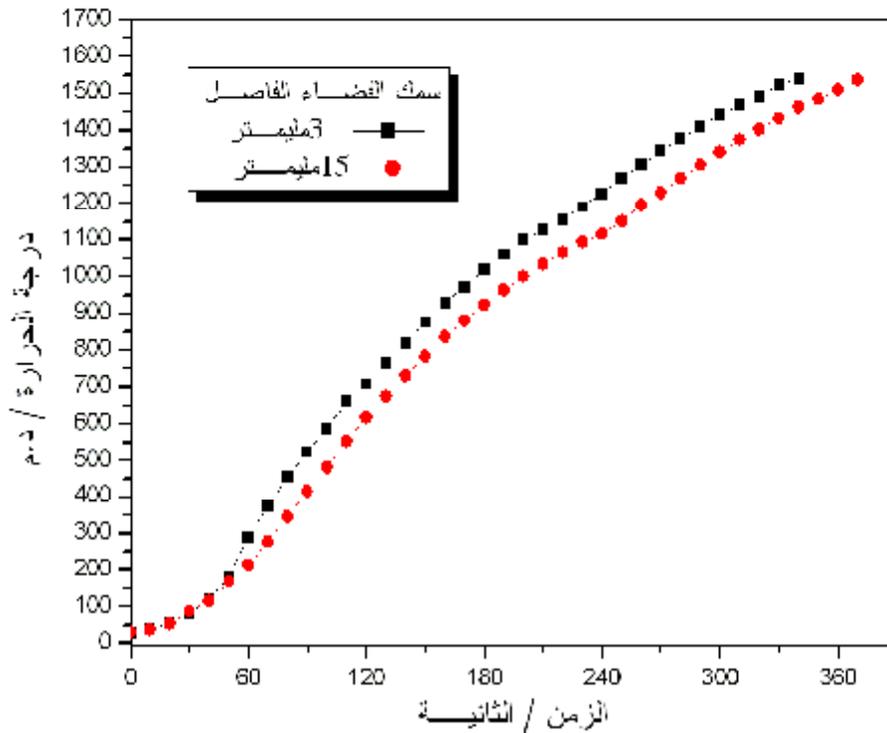
إن وجود نظام العزل الحراري، عند التسخين بموجات الميكرو، مهم وضروري. ونتيجة هذه الأهمية، فإن معرفة تأثير تصميم نظام العزل الحراري، على التسخين بموجات الميكرو، وفهم الطريقة المثلى للتصميم، تساعد على الوصول لتسخين أحسن، مع توفير أكثر للطاقة وللوقت.

#### IV-5-1 دراسة تأثير اتساع نظام العزل الحراري

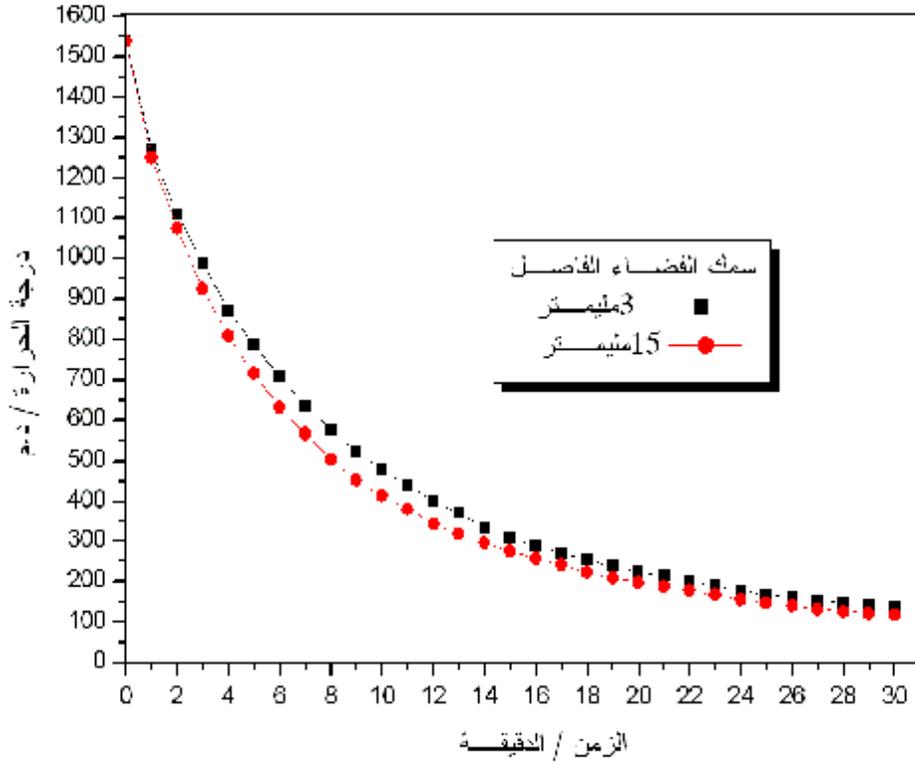
لدراسة تأثير اتساع نظام العزل الحراري، المصنوع من ألواح الألومينا المسامي، قمنا بصناعة اسطوانتين بقطرين داخليين مختلفين، وبسمك متساوي قدره 0.7 سنتيمتر. الأولى قطرها الداخلي يزيد بحوالي 6 ملليمتر عن القطر الخارجي لعنصر التسخين المقدر بـ 4.9 سنتيمتر، أي أنه عند وضع عنصر التسخين داخله، يكون الفضاء الفاصل بين عنصر التسخين وأسطوانة نظام العزل الحراري بسمك حوالي 3 ملليمتر. أما نظام العزل الحراري الثاني، فهو بقطر داخلي يقدر بحوالي 8.1 سنتيمتر، أي أن الفضاء الفاصل بين عنصر التسخين وأسطوانة نظام العزل الحراري، عند وضعه داخلها ( في مركزها ) هو حوالي 1.5 سنتيمتر. أما غطاء نظامي العزل، فهو بسمك 1 سنتيمتر وقاعدتها هي بسمك 3 سنتيمتر مع وجود أخدود في أسفلها عند مركزها بقطر 1.5 سنتيمتر وسمك 1 سنتيمتر هو مكان توضع قاعدة المزودج الحراري كما سبق توضيحه في الفصل السابق. لقد إستعملنا عنصر تسخين مصنوع من كبريتيد السليكون ، مضاف إليه 5 % من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ). بعد وضع الجملة عنصر تسخين / نظام عزل حراري . نقوم في كل مرة بقياس درجة حرارة التسخين للجملة، من أجل كل نظامي العزل السابقين، وهذا كل 10 ثواني إلى غاية الوصول إلى نفس درجة الحرارة تقريبا ، 1540 م° للنظام الأول و 1538 م° للنظام الثاني. بعد ذلك نقوم بتسجيل تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن ، كل دقيقة ولمدة 30 دقيقة.

الشكلين IV-20 و IV-21 ، يمثلان منحنيات تغير درجة الحرارة، لمرحلتي التسخين والتبريد على التوالي نلاحظ من منحنى التسخين، أنه بزيادة اتساع نظام العزل الحراري من الداخل، ينزاح منحنى التسخين نحو الأسفل، حيث أن زمن الوصول إلى نفس درجة الحرارة تقريبا، يزداد بزيادة اتساع نظام العزل الحراري من الداخل ، أي أنه كلما كان الفضاء المحصور، بين نظام العزل الحراري من الداخل وعنصر التسخين، صغير، كان الزمن أقل، من أجل الوصول إلى نفس درجة الحرارة . يعود ذلك أساسا إلى أن الفضاء الأوسع يأخذ وقت أطول ليصبح بنفس درجة حرارة الفضاء الضيق، هذا ما يجعل عنصر التسخين يفقد حرارة أكبر في الفضاء المحيط به، كلما كان هذا الفضاء أوسع. كما يمكن للحرارة أن تضيع كذلك، عبر الحد الفاصل بين غطاء نظام العزل، وأسطوانته من جهة وبين أسطوانته وقاعدته من جهة أخرى، حيث أن قطر الحد الفاصل، يزيد بزيادة القطر الداخلي، لأسطوانة نظام العزل الحراري، ذات السمك الثابت، وبذلك زيادة الضياع في الحرارة مع زيادة القطر الداخلي، لأسطوانة نظام العزل الحراري.

أما ما يمكن ملاحظته من منحنيات التبريد، هو أن درجة الحرارة تنخفض بسرعة أكبر في نظام العزل ذو الأسطوانة الواسعة مقارنة بنظام العزل ذو الأسطوانة الضيقة ، ويمكن تفسير ذلك بكون الفضاء الأوسع المحيط بعنصر التسخين تضييع فيه الحرارة بطريقة أكبر من الفضاء الضيق ، كما أن الحيز الفاصل بين أسطوانة نظام العزل وقاعدته من جهة، وبين الأسطوانة وغطاء نظام العزل من جهة أخرى، يزيد بزيادة قطر الأسطوانة، مما يسمح بضياع أكبر للحرارة . ولهذا تصميم نظام عزل يحيط بعنصر التسخين عن قرب ضروري من أجل الريح في درجة الحرارة، وتقليل التدرجات الحرارية داخل نظام العزل الحراري.



الشكل IV - 20 منحنيات التسخين من أجل سمك مختلف للفضاء الفاصل بين عنصر التسخين و أسطوانة نظام العزل الحراري



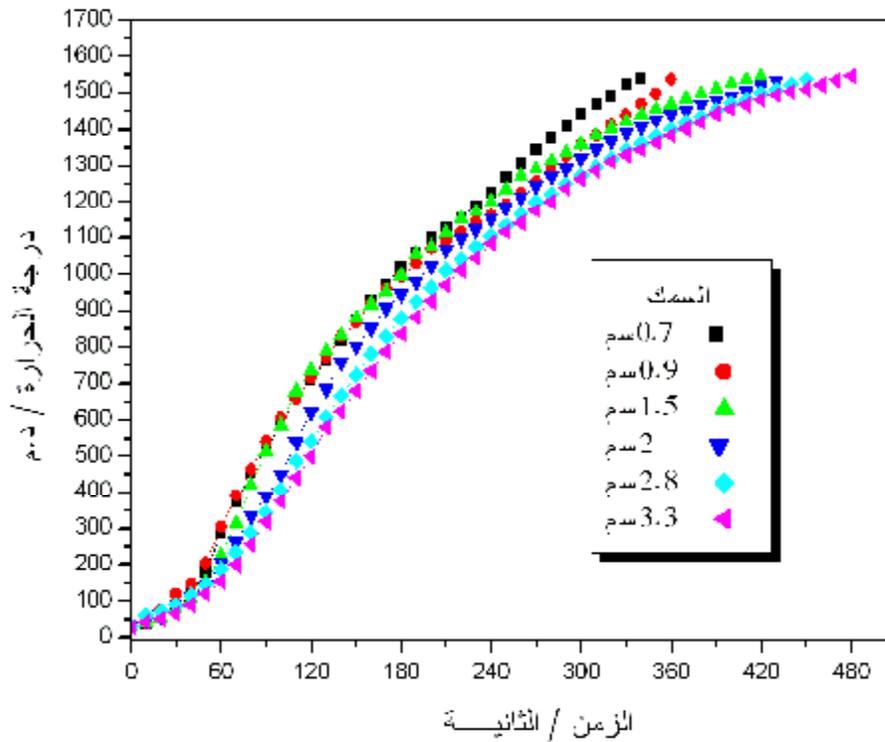
الشكل IV - 21 منحنيات التسخين من أجل سمك مختلف للفضاء الفاصل بين عنصر التسخين و أسطوانة نظام العزل الحراري

#### IV-2-5 دراسة تأثير سمك نظام العزل الحراري

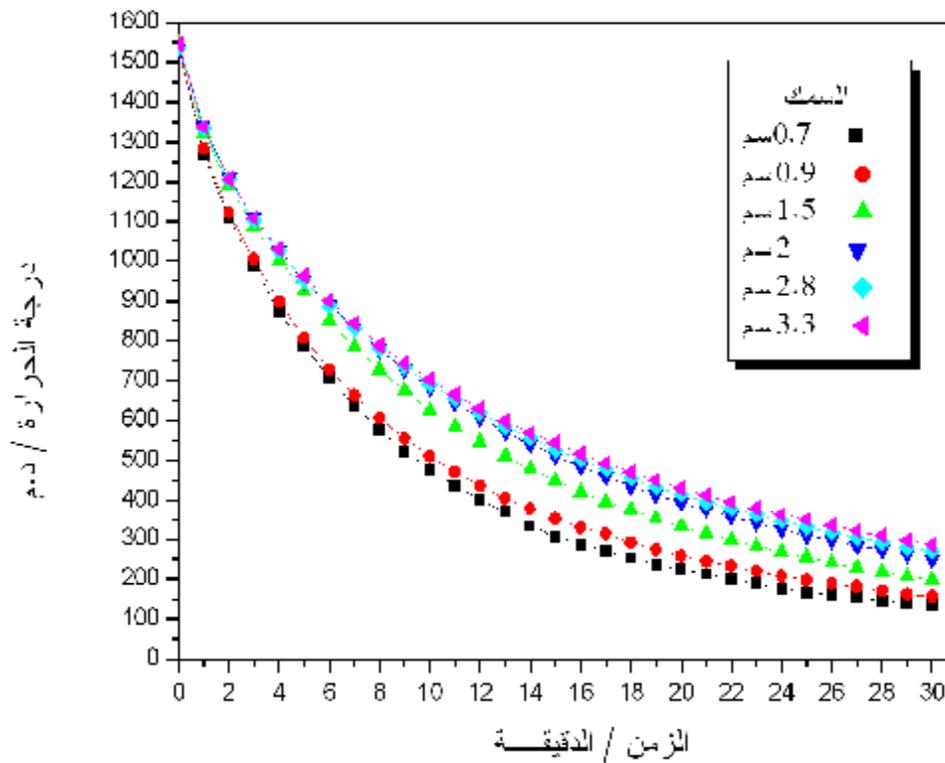
لدراسة تأثير سمك نظام العزل الحراري على التسخين بموجات الميكرو، قمنا بصناعة أسطوانة من ألواح الألومينا المسامي بقطر داخلي 5.5 سنتيمتر و قطر خارجي 12.1 سنتيمتر أي بسمك 3.3 سنتيمتر ثم قمنا بإنقاص السمك في كل مرة، كما سبق توضيحه في الفصل السابق. وقياس درجة حرارة التسخين من أجل كل سمك جديد لأسطوانة نظام العزل الحراري، وهذا حتى الوصول إلى نفس درجة الحرارة تقريبا ( $1540 \pm 6^\circ \text{C}$ ) ، تسجل درجة حرارة التسخين، كل 10 ثواني ثم بعد ذلك يتم تسجيل تغير درجة حرارة التبريد، مع الزمن كل دقيقة واستغرقت مرحلة التبريد 30 دقيقة . يجب الإشارة أن غطاء نظام العزل وقاعدته هما نفسهما المستعملين سابقا كما أن عنصر التسخين هو نفسه المستعمل سابقا في دراسة تأثير اتساع نظام العزل. الشكلين IV-22 و IV-23 يمثلان منحنيات تغير درجة الحرارة لمرحلتي التسخين والتبريد على التوالي . نلاحظ من منحنيات التسخين، أن كل منحنى لتغير درجة الحرارة مع الزمن من أجل كل نظام عزل حراري أي من أجل كل سمك لهذا الأخير ينزاح نحو الأسفل بزيادة سمك أسطوانة نظام العزل الحراري ، هذا يعني

أن درجة الحرارة التي يبلغها عنصر التسخين بموجات الميكرو عند نفس الزمن، تتناسب عكسياً مع سمك نظام العزل الحراري . نلاحظ كذلك عدم استقرار نسبي في المنحنيين الممثلين لدرجة التسخين من أجل السمكين 0.7 سنتيمتر و 0.9 سنتيمتر وخاصة مع ارتفاع درجة الحرارة لأكثر من 1000 م° وقد يعزى ذلك إلى وجود ضياع في الحرارة عبر نظامي العزل إلى الخارج نتيجة سمكيهما الصغيرين نوعاً ما ، ولكن رغم ذلك استطاعا الوصول إلى نفس درجة الحرارة وفي أقل مدة مقارنة ببقية أنظمة العزل الحراري وهذا ما يعني أن استطاعة موجات الميكرو التي تصل لعنصر التسخين فيهما كانت أكبر من الاستطاعة التي تصل للبقية. وبصفة عامة فإن عنصر التسخين، استطاع الوصول إلى نفس درجة الحرارة تقريباً، لجميع أنظمة العزل لكن في أوقات مختلفة تزيد بتزايد سمك أسطوانة نظام العزل الحراري ، أي أن زمن الوصول إلى نفس درجة الحرارة تقريباً، يزيد بزيادة السمك لنظام العزل الحراري ، ما يمكن قوله في هذه الحالة أن طاقة موجات الميكرو التي تصل إلى عنصر التسخين وهو داخل نظام العزل الحراري تتناقص بزيادة سمك نظام العزل، أي أن هناك احتمالين لتفسير ذلك. أولى الاحتمالات أن نظام العزل الحراري المصنوع من ألواح الألومينا المسامي، يمتص جزءاً من طاقة موجات الميكرو وتزيد الطاقة الممتصة بزيادة سمك نظام العزل، الاحتمال الثاني أن نظام العزل يقوم بعكس جزء من هذه الطاقة نحو الخارج وبالتالي لا يسمح لها باختراق نظام العزل ووصولها إلى عنصر التسخين وأن نسبة ما يعكسه تزيد بزيادة سمك نظام العزل لكن هذا الاحتمال ضعيف جداً لأن المواد التي تبدي هذا السلوك هي المواد التي لها معاملات فقدان عازلي كبير جداً على العكس من الألومينا التي هي ذات معامل فقدان عازلي صغير وهذا ما يرجح أكثر الاحتمال الأول حيث أنه من جهة لا يمكن أن تكون الألومينا المصنوع منها نظام العزل نقية 100 % حيث تحتوي على نسب ولو ضئيلة جداً من الشوائب ( ولو من رتبة أقل من 1/100 ) هذه الأخيرة يمكن أن تمتص جزءاً من موجات الميكرو خاصة مع ارتفاع درجة حرارتها ومن جهة أخرى يمكن للألومينا عند ارتفاع درجة حرارتها أن يرتفع معامل الفقدان العازلي لها وأن تمتص جزءاً ولو صغيراً من موجات الميكرو وتزيد نسبة ما تمتصه كل من الشوائب و الألومينا عند ارتفاع درجة حرارتها بزيادة سمك نظام العزل المصنوع من الألومينا.

أما بالنسبة لمنحنيات التبريد ومن أجل كل سمك لنظام العزل الحراري فإننا نلاحظ إنزياح للمنحنى إلى الأعلى مع زيادة سمك نظام العزل الحراري أي أن تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن تنقص بزيادة السمك ، يمكن القول أن فقدان درجة الحرارة مع الزمن يزيد كلما نقص سمك نظام العزل أكثر ، أي أن تسرب الحرارة عبر جدران نظام العزل يزيد كلما كان سمك نظام العزل أرفع وهذا ناتج عن الناقلية الحرارية المنخفضة لألواح الألومينا المسامي أي أنه بزيادة السمك يصبح انتقال الحرارة عبر جدران نظام العزل الحراري إلى المحيط الخارجي أبطأ. ونتيجة لكل ما سبق يمكن القول أنه يجب عند تصميم نظام العزل الحراري في أنظمة المعالجة بموجات الميكرو يجب مراعاة أن لا يكون سمك نظام العزل كبير جداً ولا أن يكون صغير جداً بحيث يتم التوفيق بين سرعة التسخين وسرعة التبريد.



الشكل IV - 22 منحنيات التسخين من أجل سمك مختلف لأسطوانة نظام العزل الحراري



الشكل IV - 23 منحنيات التبريد من أجل سمك مختلف لأسطوانة نظام العزل الحراري

#### 6-IV دراسة تأثير تغير استطاعة موجات الميكرو المكافئة في تسخين المنظومة سسبيكتور/عازل حراري

يعمل فرن موجات الميكرو المستخدم في هذه الدراسة بنظام تغذية كهربائية مستمر بالنسبة لاستطاعة الخروج القصوى ( 100 % = 900 واط ) ، أو بنظام تغذية متقطع من أجل الحصول على استطاعات مكافئة أقل ، حيث يقوم بتغذية المغنطرون (منبع الموجات ) بشكل متقطع ودوري بأزمنة متفاوتة تسمح بالحصول على دفعات من موجات الميكرو غير مستمرة بنسب استطاعة تمثل 20 % و 40 % و 60 % و 80 % من الإستطاعة القصوى . هذه النسب تؤدي إلى الحصول على استطاعات مكافئة للإستطاعات المستمرة 180 و 360 و 540 و 720 واط على الترتيب. استعملنا في هذه الدراسة عنصر تسخين (سسبيكتور) مصنوع من كربيد السيلكون (SiC) الصناعي مضاف إليه 5 % من أوكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) المخبري النقي.

#### 1.6-IV التغذية المستمرة بـ 100 % من الإستطاعة القصوى

نقوم ببرمجة استطاعة موجات الميكرو هذه المرة بـ 100 % من الإستطاعة الكلية أي 900 واط و زمن التسخين دائما بـ 10 دقائق. نقوم بتشغيل الفرن بعد ذلك وتسجيل كل تغيرات درجة الحرارة مع الزمن . نحصل على النتائج المدونة في الجدول 2-IV

#### الجدول 2-IV نتائج تغير درجة حرارة مركز عنصر التسخين مع الزمن بنسبة الاستطاعة 80%

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
درجة الحرارة (م°)	31	379	792	1048	1175	1265	1327	1377	1425	1456	1483

بعد توقف تشغيل فرن موجات الميكرو مباشرة نقوم بتشغيل عداد للزمن ثم تسجيل تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن بأخذ درجة حرارة واحدة كل دقيقة وذلك لمدة 15 دقيقة. نحصل على النتائج المدونة في

#### الجدول 3-IV

**الجدول 3-IV** قيم درجات حرارة مركز عنصر التسخين أثناء التبريد بعد تطبيق استطاعة بنسبة 100 %

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7
درجة الحرارة (م°)	1483	1279	1149	1037	935	844	767	704
الزمن (دقيقة)	8	9	10	11	12	13	14	15
درجة الحرارة (م°)	636	579	541	508	484	462	442	423

**2.6-IV** التغذية المتقطعة بـ 80 % من الإستطاعة القصوى

نقوم ببرمجة استطاعة موجات الميكرو هذه المرة بـ 80 % من الإستطاعة الكلية و زمن التسخين دائما بـ 10 دقائق. نقوم بتشغيل الفرن بعد ذلك وتسجيل كل تغيرات درجة الحرارة مع الزمن . نحصل على النتائج المدونة في الجدول 4-IV

**الجدول 4-IV** نتائج تغير درجة حرارة مركز عنصر التسخين مع الزمن بنسبة الاستطاعة 80%

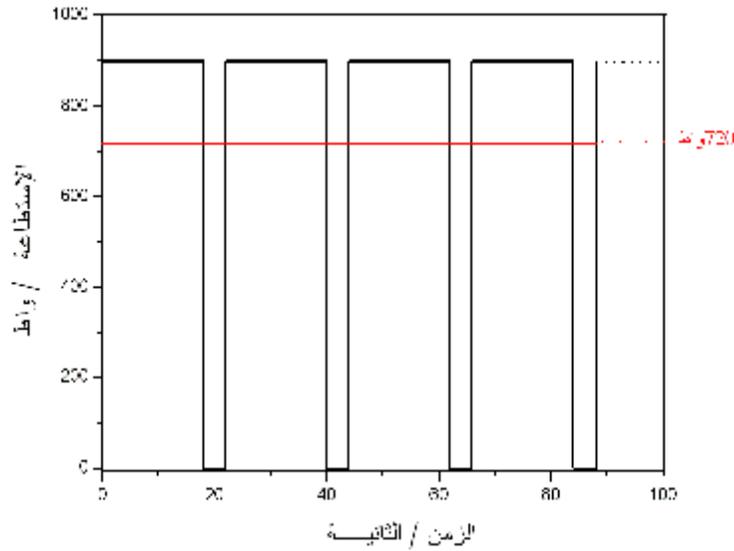
الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
درجة الحرارة (م°)	35	190	504	741	877	991	1078	1139	1209	1242	1261

بعد توقف تشغيل فرن موجات الميكرو مباشرة نقوم بتشغيل عداد للزمن ثم تسجيل تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن بأخذ درجة حرارة واحدة كل دقيقة وذلك لمدة 15 دقيقة. نحصل على النتائج المدونة في

**الجدول 5-IV****الجدول 5-IV** قيم درجات حرارة مركز عنصر التسخين أثناء التبريد بعد تطبيق استطاعة بنسبة 80 %

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7
درجة الحرارة (م°)	1261	1090	956	857	777	707	642	583
الزمن (دقيقة)	8	9	10	11	12	13	14	15
درجة الحرارة (م°)	534	497	459	436	415	394	375	363

يمثل الشكل 24-IV نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنترون بـ 80 % من الإستطاعة الكلية. حيث يغذى المغنترون ليصدر موجات الميكرو باستطاعة عظمى ( 900 واط ) مدة 18 ثانية ثم تقطع عنه التغذية ليتوقف عن اصدار الموجات مدة 4 ثواني ويستمر بهذا النمط حتى نهاية برنامج التسخين بعد 10 دقائق. برنامج التسخين بالنمط المتقطع 80 % يكافئه تسخين بنمط مستمر باستطاعة خروج قدرها 720 واط. من خلال الجدول 4-IV يمكن ملاحظة أن أعلى درجة حرارة بلغها عنصر التسخين بهذا النمط هي 1261 م° بعد عشر دقائق من التسخين وبسرعة تسخين متوسطة تقدر بـ 123 م° / دقيقة.



الشكل IV - 24 نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنترون بـ 80 % من الاستطاعة الكلية

#### 3.6-IV التغذية المتقطعة بـ 60 % من الإستطاعة القصوى

تبرمج استطاعة موجات الميكرو بـ 40 % من الإستطاعة الكلية ويبقى على نفس زمن التسخين السابق بـ 10 دقائق. وبتابع نفس الخطوات السابقة نحصل على النتائج المدونة في الجدول 6-IV

الجدول 6-IV نتائج تغير درجة حرارة مركز عنصر التسخين مع الزمن بنسبة الإستطاعة 60 %

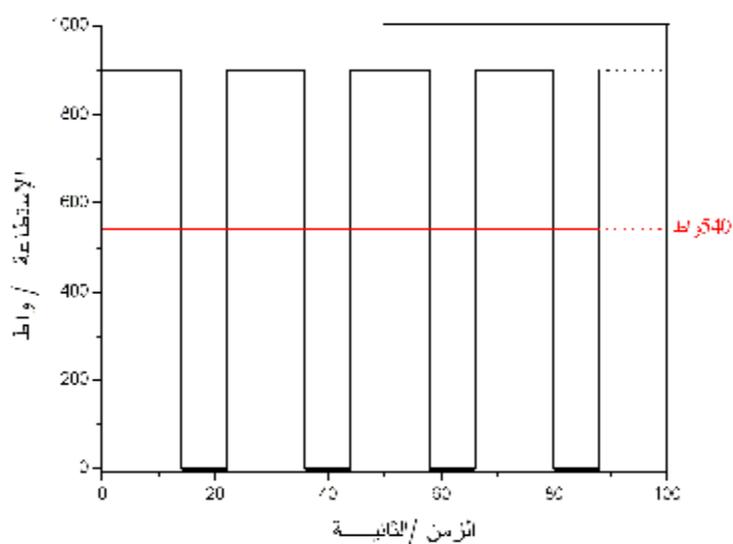
الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
درجة الحرارة (م°)	34	171	382	548	690	820	921	982	1036	1054	1079

بعد توقف تشغيل فرن موجات الميكرو مباشرة نقوم بتشغيل عداد للزمن ثم تسجيل تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن وبتتابع نفس الخطوات السابقة. نحصل على النتائج المدونة في الجدول 7-IV

**الجدول 7-IV** قيم درجات حرارة مركز عنصر التسخين أثناء التبريد بعد تطبيق استطاعة بنسبة 60 %

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7
درجة الحرارة (م°)	1079	935	829	742	680	617	564	519
الزمن (دقيقة)	8	9	10	11	12	13	14	15
درجة الحرارة (م°)	476	435	407	387	366	345	334	325

يوضح الشكل 25-IV نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنترين بـ 60 % من الإستطاعة الكلية. حيث يغذى المغنترين ليصدر موجات الميكرو باستطاعة كلية ( 900 واط ) مدة 14 ثانية ثم تقطع عنه التغذية ليتوقف عن إصدار الموجات مدة 8 ثواني ويستمر بهذا النمط حتى نهاية برنامج التسخين بعد 10 دقائق. كما يظهر نفس الشكل أن التسخين بالنمط المتقطع 60 % يكافئه تسخين بنمط مستمر باستطاعة خروج قدرها 540 واط. نلاحظ في الجدول 6-IV أن أعلى درجة حرارة بلغت المنظومة عنصر التسخين / عازل حراري بهذا النمط هي 1070 م° بعد عشر دقائق من التسخين وبسرعة تسخين متوسطة تقدر بـ 104 م° / دقيقة.



**الشكل 25 - IV** نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنترين بـ 60 % من الاستطاعة الكلية

**IV-4.6 التغذية المتقطعة بـ 40 % من الإستطاعة القصوى**

نقوم ببرمجة الفرن عند استطاعة موجات الميكرو بـ 40 % من الإستطاعة القصوى ويبقى على نفس زمن التسخين السابق بـ 10 دقائق ونقوم بتسجيل تغيرات درجة حرارة التسخين مع الزمن ، نحصل على النتائج المدونة في الجدول 8-IV

**الجدول 8-IV نتائج تغير درجة حرارة مركز عنصر التسخين مع الزمن بنسبة الاستطاعة 40%**

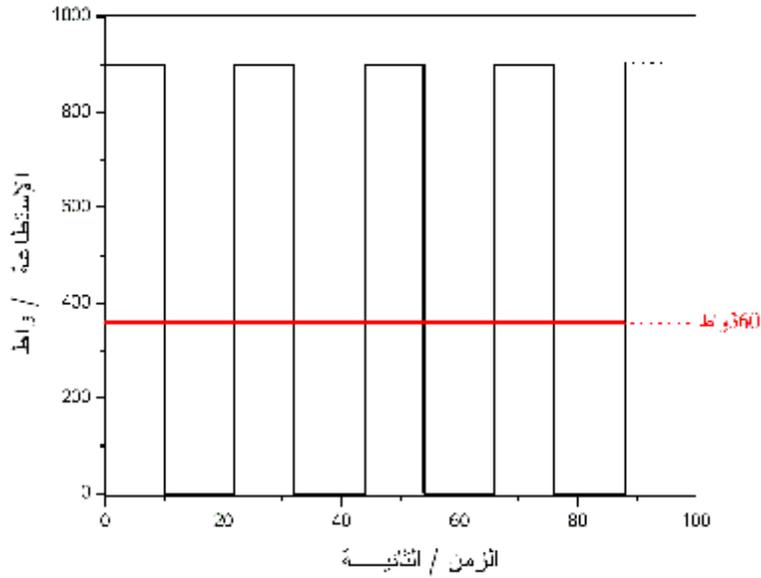
الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
درجة الحرارة (م°)	30	117	187	255	333	397	447	485	519	550	575

بعد توقف تشغيل فرن موجات الميكرو مباشرة نقوم بتشغيل عداد للزمن ثم تسجيل تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن وبتابع نفس الخطوات السابقة. نحصل على النتائج المدونة في الجدول 9-IV

**الجدول 9-IV قيم درجات حرارة مركز عنصر التسخين أثناء التبريد بعد تطبيق استطاعة بنسبة 40 %**

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7
درجة الحرارة (م°)	575	502	452	412	371	343	322	301
الزمن (دقيقة)	8	9	10	11	12	13	14	15
درجة الحرارة (م°)	284	268	255	243	230	221	213	206

يوضح الشكل IV-26 نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنطرون بـ 40 % من الإستطاعة الكلية. حيث تغلق دارة تغذية المغنطرون ليصدر موجات الميكرو باستطاعة 900 واط مدة 10 ثانية ثم تقطع عنه التغذية بفتح الدارة ليتوقف عن إصدار الموجات مدة 12 ثانية ويستمر بهذا النمط حتى نهاية برنامج التسخين بعد 10 دقائق. كما يظهر نفس الشكل أن التسخين بالنمط المتقطع 40 % يكافئه تسخين بنمط مستمر باستطاعة خروج قدرها 360 واط. نلاحظ في الجدول 8-IV أن أعلى درجة حرارة بلغت المنظومة عنصر التسخين / عازل حراري بهذا النمط هي 575 م° بعد عشر دقائق من التسخين وبسرعة تسخين متوسطة تقدر بـ 54 م° / دقيقة



الشكل IV - 26 نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنطرون بـ 40 % من الاستطاعة الكلية

#### IV-5.6 التغذية المتقطعة بـ 20 % من الإستطاعة القصوى

تبرمج استطاعة موجات الميكرو بأضعف مستوى لها والمقدر بـ 20 % من الإستطاعة الكلية لمدة 10 دقائق تسجل خلالها الحرارة المقاسة في كل دقيقة إلى نهاية التسخين. نحصل على النتائج المدونة في

الجدول IV-10

الجدول IV-10 نتائج تغير درجة حرارة مركز عنصر التسخين مع الزمن بنسبة الاستطاعة 20%

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
درجة الحرارة (م°)	32	99	134	173	200	237	266	290	312	333	353

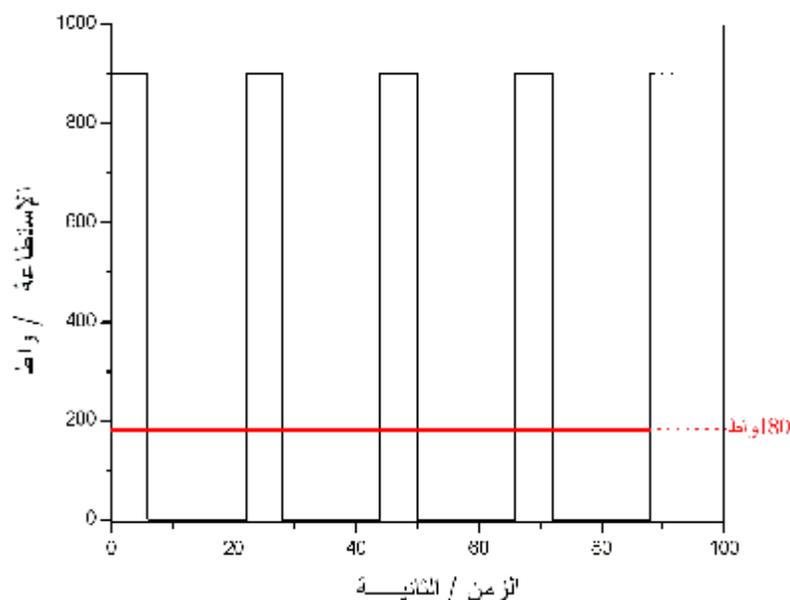
بعد توقف تشغيل فرن موجات الميكرو مباشرة نقوم بتشغيل عداد للزمن ثم تسجيل تغير درجة حرارة التبريد مع الزمن بأخذ درجة حرارة واحدة كل دقيقة وذلك لمدة 15 دقيقة كما هو الحال في المرات السابقة. نحصل

على النتائج المدونة في الجدول IV-11

الجدول 11-IV قيم درجات حرارة مركز عنصر التسخين أثناء التبريد بعد تطبيق استطاعة بنسبة 20 %

الزمن (دقيقة)	0	1	2	3	4	5	6	7
درجة الحرارة (°م)	353	305	284	262	246	230	217	207
الزمن (دقيقة)	8	9	10	11	12	13	14	15
درجة الحرارة (°م)	197	187	176	170	164	158	153	148

يوضح الشكل 27-IV نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنطرون بـ 20% من الإستطاعة الكلية. حيث تغلق دارة تغذية المغنطرون ليصدر موجات الميكرو باستطاعة 900 واط مدة 6 ثواني ثم تقطع عنه التغذية بفتح الدارة ليتوقف عن إصدار الموجات مدة 16 ثانية ويستمر بهذا النمط حتى نهاية برنامج التسخين بعد 10 دقائق. كما يظهر نفس الشكل أن التسخين بالنمط المتقطع 20 % يكافئه تسخين بنمط مستمر باستطاعة خروج قدرها 180 واط. نلاحظ في الجدول 10-IV أن أعلى درجة حرارة بلغت المنظومة عنصر التسخين / عازل حراري بهذا النمط هي 353 °م بعد عشر دقائق من التسخين وبسرعة تسخين متوسطة تقدر بـ 32 °م / دقيقة



الشكل IV - 27 نمط تقطع استطاعة موجات الميكرو التي يولدها المغنطرون بـ 20% من الاستطاعة الكلية

يمكن تلخيص نتائج تأثير تغير مستويات استطاعة موجات الميكرو ( 100 % ، 80 % ، 60 % ، 40 % و 20 % ) على عملية تسخين عنصر التسخين في الجدول IV-12.

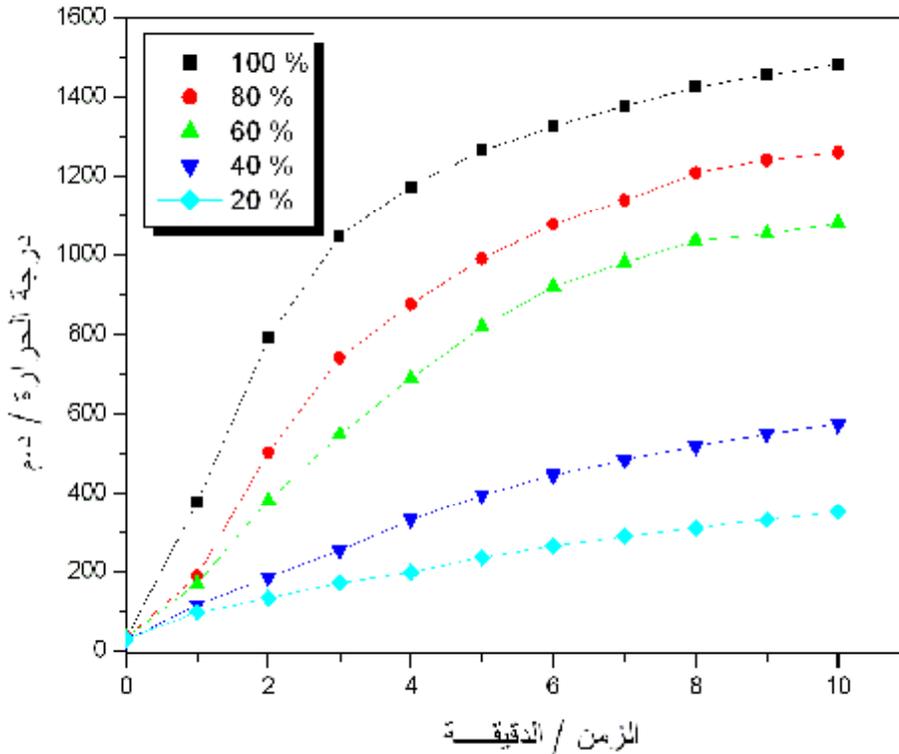
**الجدول IV-12** نتائج تأثير استطاعة موجات الميكرو على تسخين المنظومة عنصر التسخين – عازل حراري.

نسبة الإستطاعة ( % )	100	80	60	40	20
الإستطاعة المكافئة ( واط )	900	720	540	360	180
مدة التسخين ( دقيقة )	10	10	10	10	10
درجة الحرارة القصوى ( م° )	1483	1261	1079	575	353
سرعة التسخين ( م° / دقيقة )	145	123	104	54	32

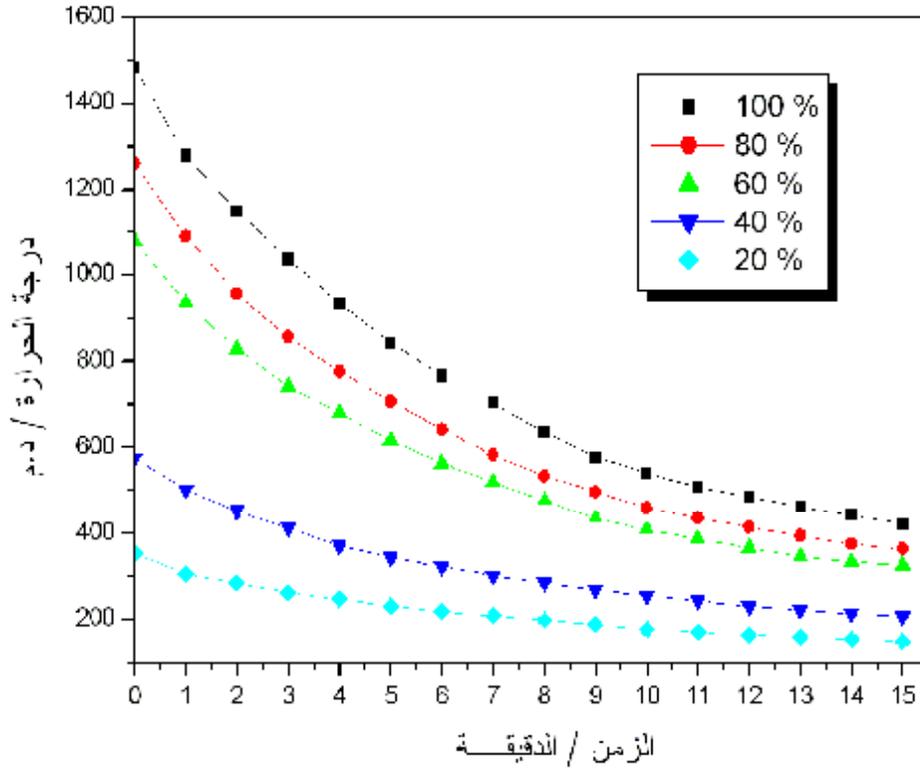
من خلال النتائج المدونة في الجداول IV-2، 4، 6، 8، 10 نرسم منحنيات التسخين من أجل مختلف نسب استطاعات الخروج ويمثل الشكل IV-28 هذه المنحنيات. يبين الشكل IV-28 أن درجة الحرارة القصوى وسرعة التسخين المتوسطة تتناسبان طرديا مع نسبة استطاعة موجات الميكرو العاملة ، بمعنى كلما ازدادت نسبة الاستطاعة المطبقة كلما زادت درجة الحرارة القصوى التي يستطيع عنصر التسخين الوصول إليها بعد 10 دقائق من التسخين ، وتزداد بطبيعة الحال سرعة التسخين المتوسطة. لو عدنا إلى المعادلة (1) نجد أن الاستطاعة الممتصة تتغير خطيا مع التردد ، ثابت العزل النسبي ( $\epsilon'$ ) ، ظل الفقدان ( $\tan d$ ) ، ومربع الحقل الكهربائي الداخلي أي أنه إذا كان كل من التردد وثابت العزل وزاوية فقدان العزلية ثابتين يبقى فقط تأثير الحقل الكهربائي الداخلي الذي يتناسب طرديا مع الحقل الكهربائي الخارجي المطبق ، إذا تكلمنا على أساس الاستطاعة المكافئة لأنماط التسخين فإنه يمكن القول أن درجة حرارة التسخين وسرعة التسخين تتناسب طرديا مع شدة الحقل الكهرومغناطيسي المطبق داخل حجرة التسخين وهذا ما تدعمه المعادلة (1) ولذلك ومن أجل معالجة فعالة والوصول إلى تسخين جيد بموجات الميكرو يجب تطبيق حقل كهربائي فعال ، أي العمل باستطاعة خروج عالية نسبيا وهذا للوصول إلى درجات حرارة عالية في التسخين.

بالاعتماد على النتائج المدونة في الجداول IV-3، 5، 7، 9، 11 إلى نرسم منحنيات التبريد بعد تطبيق نسب استطاعات خروج مختلفة و الشكل IV-29 يظهر هذه المنحنيات . نلاحظ من الشكل IV-29 أن درجة

حرارة التبريد تتناسب طرذا مع مقلوب زمن التبريد بمعنى أن  $T$  تابع في  $t$  ولهذا يكون التبريد سريع في أول الأمر ثم تنقص حدته شيئاً فشيئاً في النهاية . فعلى سبيل المثال ، بعد الدقيقة الأولى من عملية التبريد تنخفض درجة الحرارة بالمقادير 204 ، 171 ، 144 ، 73 ، 48 م° الموافقة لنسب استطاعات التسخين 100 % ، 80 % ، 60 % ، 40 % ، 20 % على التوالي ، وهي مقادير كبيرة مقارنة بانخفاض درجة الحرارة المسجلة عند الدقيقة الأخيرة من التبريد وهي 19 ، 12 ، 9 ، 7 ، 5 م° من أجل نفس استطاعات التسخين السابقة على الترتيب . لا تظهر منحنيات التبريد أي اعوجاج يعزى إلى تحولات طوريه تكون قد حدثت في مكونات عنصر التسخين المصنوع من كربيد السليكون الصناعي الصنف الثاني مضاف إليه 5 % من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) ، كما أننا لم نلاحظ على شاشة مقياس درجة الحرارة أي توقف عند درجة حرارة معينة لمدة معينة ، كما لم نلاحظ تباطؤ في التبريد في مجال معين من درجة الحرارة يعقبه تسارع التبريد في مجال درجة حرارة موال . إن عدم ظهور تغير ما في مرحلة التبريد كدليل على حدوث تحول أو انتقال طوري في عنصر التسخين في مراحل التبريد للمنظومة عنصر التسخين – عازل حراري قد يعزى إلى سرعات التبريد السريعة نوعاً ما والتي لا تسمح للذرات في عنصر التسخين من ترتيب نفسها في بنية طور جديد.



الشكل IV - 28 منحنيات تغير درجة حرارة مركز عنصر التسخين مع الزمن بتطبيق الإستطاعات النسبية 100 % ، 80 % ، 60 % ، 40 % ، 20 %



الشكل IV - 29 منحنيات تبريد مركز عنصر التسخين بعد التسخين بنسب إستطاعات مختلفة لموجات الميكرو

#### IV-7 دراسة تدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين

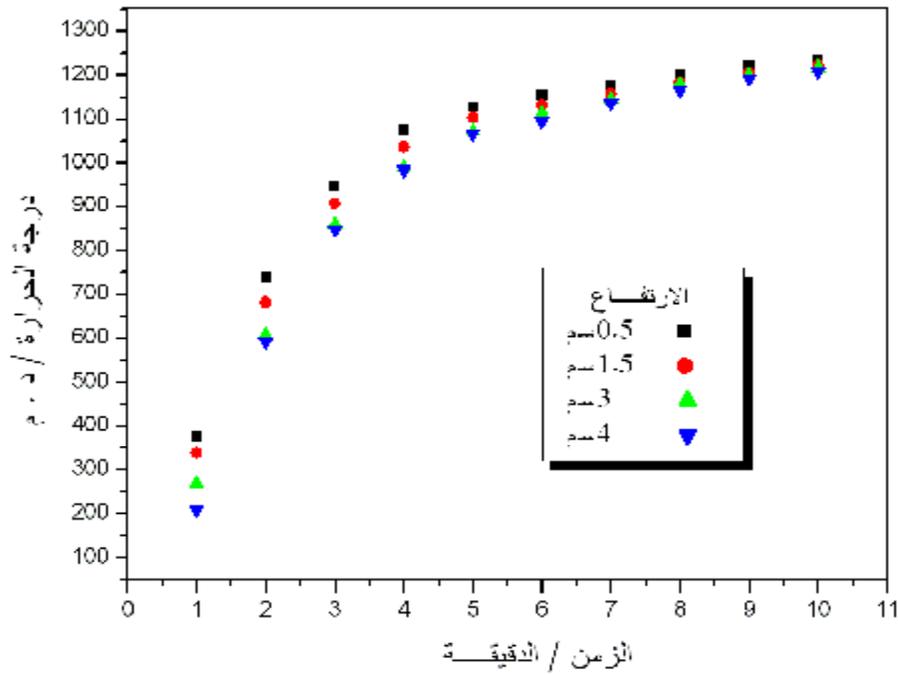
من أجل دراسة تدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين عند مستويات من الإرتفاع مختلفة قمنا بقياس درجة الحرارة عند أربعة ارتفاعات مختلفة داخل عنصر التسخين هي 0.5 سم ، 1.5 سم ، 3 سم و 4 سم وذلك باستعمال مزدوجين حراريين علوي وسفلي في نفس الوقت وهذا من أجل قياس درجة الحرارة عند الإرتفاع 0.5 سنتيمتر للمزدوج السفلي و الإرتفاع 4 سنتيمتر للمزدوج العلوي ، أما بالنسبة للإرتفاعين 1.5 و 3 سنتيمتر فاستعملنا المزدوج الحراري العلوي فقط لقياس درجة الحرارة لهما على التوالي. لقد استعملنا عنصر تسخين مصنوع من كربيد السليكون مضاف إليه 5 % من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) و الجدول IV-13 يمثل تغيرات درجة حرارة التسخين عند ارتفاعات مختلفة داخل عنصر التسخين.

## الجدول 13-IV قيم درجات حرارة التسخين على ارتفاعات مختلفة داخل تجويف عنصر التسخين

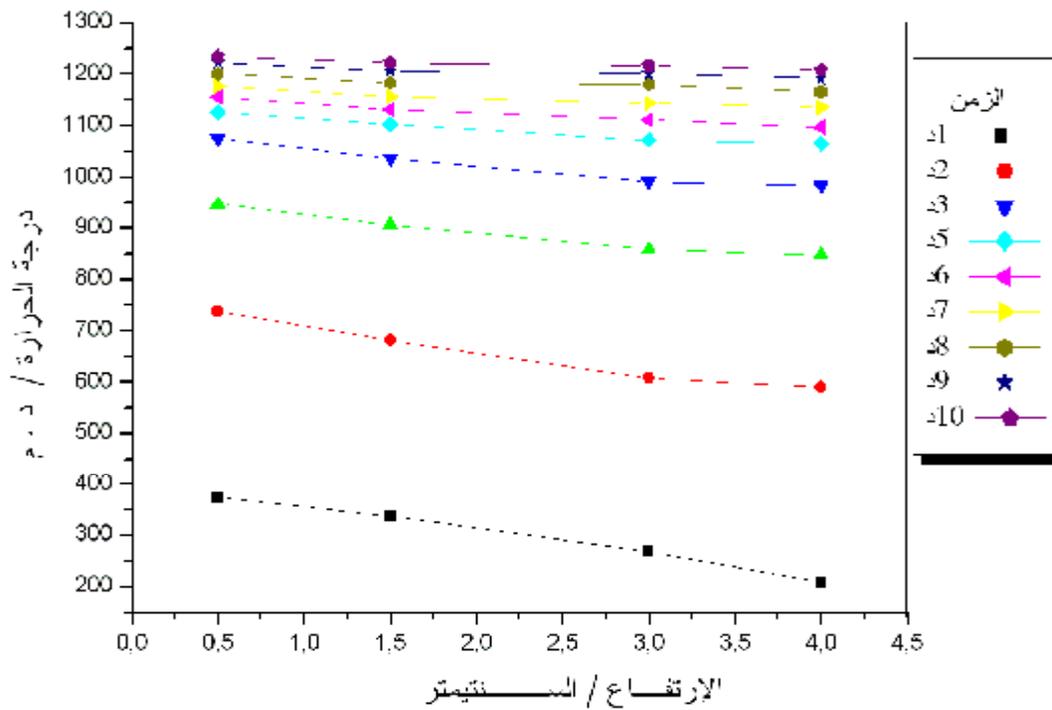
الارتفاع / دقيقة	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5 سم	375	738	947	1076	1127	1156	1177	1201	1223	1234
1.5 سم	337	681	906	1037	1103	1132	1157	1183	1206	1222
3 سم	268	608	858	991	1072	1112	1144	1180	1201	1217
4 سم	208	591	847	984	1066	1097	1136	1166	1192	1209

نلاحظ جليا من خلال المنحنى ( الشكل IV - 30 )، الممثل لقيم درجات حرارة التسخين لعنصر التسخين عند الارتفاعات 0.5 ، 1.5 ، 3 ، 4 سنتيمتر أنه هناك انزياح للمنحنى نحو الأسفل مع زيادة الارتفاع بمعنى أن درجات الحرارة تتناقص كلما ارتفعنا أكثر داخل عنصر التسخين ، كما نلاحظ كذلك أن الفارق بين درجات الحرارة لمختلف الارتفاعات يأخذ في الانخفاض مع زيادة وارتفاع درجة الحرارة أي أنه كلما ارتفعت درجة الحرارة أكثر داخل عنصر التسخين تقترب درجات الحرارة عند مختلف مستويات الارتفاعات من بعضها البعض وهذا ما يوضحه أكثر الشكل 31-IV حيث نلاحظ أنه بداية من الدقيقة الخامسة من بداية اختبار التسخين تشكل درجات الحرارة المسجلة لمختلف الارتفاعات شبه مستقيم أفقي ، أي أن هناك تسخين متجانس داخل عنصر التسخين وتوزيع شبه منتظم لدرجات الحرارة فيه وذلك مع ارتفاع درجة الحرارة.

في الحقيقة التناقص الملاحظ في درجة الحرارة، سببه توزيع الحقل الكهرومغناطيسي في الحجرة متعددة الأنماط. بتعبير آخر تخلق التداخلات الناتجة عن الانعكاسات المختلفة لموجات الميكرو على جدران حجرة التسخين نقاط تكون فيها شدة الحقل أعظمية ونقاط أخرى تكون فيها شدته أصغريه . يشكل مجموع هذه النقاط شبكة (مناطق) ثلاثية الأبعاد وموزعة توزيعا غير منتظم، وبالتالي يمر عنصر التسخين داخل حجرة التسخين بنقاط جديدة مختلفة من حيث العدد والشدة، فالانخفاض في درجة الحرارة يعزى إلى أنه كلما ارتفعنا داخل عنصر التسخين، تزيد النقاط التي تكون فيها محصلة الحقل ضعيفة وتنقص النقاط التي يكون فيها الحقل أعظمية، وبالتالي تنقص قيمة الطاقة الإجمالية الممتصة كلما زاد الارتفاع. يمكن اعتبار أن تأثير نظام العزل الحراري في هذه التدرجات الحرارية داخل عنصر التسخين ضعيف والدليل على ذلك هو أن التدرجات تنقص مع ارتفاع درجة الحرارة، إلى أن يصبح التسخين داخل عنصر التسخين متجانس بشكل تام تقريبا.



الشكل IV - 30 منحنيات تغير درجة الحرارة بدلالة الزمن عند إرتفاعات مختلفة داخل عنصر التسخين



الشكل IV - 31 توزيع درجة الحرارة المقاسة في تجويف عنصر التسخين بدلالة الارتفاع داخله.



(1)



(2)

الشكل IV - 32 صور فتوغرافية لعنصر تسخين داخل نظام عزل ذو اسطوانة واسعة وسميكة أثناء مرحلتين مختلفتين للتسخين.



(1)



(2)



(3)

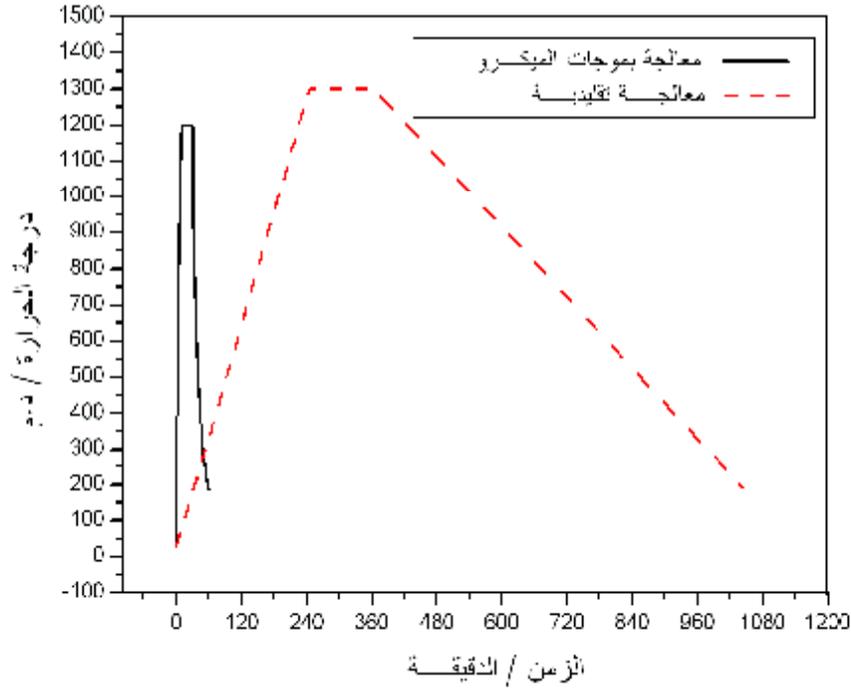
الشكل IV - 33 صور فوتوغرافية لعنصر تسخين داخل نظام عزل ذو اسطوانة ضيقة ورقيقة أثناء ثلاث مراحل مختلفة للتسخين.

## IV- 8 تحضير الأكاسيد

IV- 8- 1 تحضير مركب  $BaTiO_3-Fe_2O_3$ 

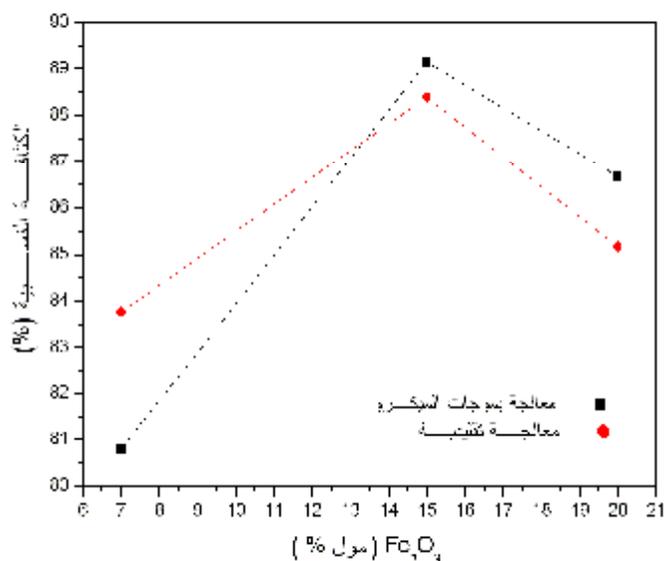
## IV- 8- 1- 1 دراسة الكثافة والأطوار

لقد قمنا بتحضير مركب  $BaTiO_3-Fe_2O_3$  بخلط نسب مختلفة من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  وفق العلاقة  $(1 - x)BaTiO_3 + x Fe_2O_3$  أين  $x$  يأخذ القيم 7، 15، و20 مول. كما سبق الإشارة إليه في الفصل السابق. بعد تحضير العينات، يتم معالجتها حرارياً، ومن أجل كل نسب الإضافات بطريقتين مختلفتين، الطريقة الأولى، تتم في فرن تقليدي، عند الدرجة  $1300^\circ\text{C}$  لمدة ساعتين وبسرعة تسخين تقدر بـ  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ، أما الطريقة الثانية، فتتم في فرن موجات الميكرو باستعمال سسبيطور عند الدرجة  $1200^\circ\text{C}$  ولمدة 20 دقيقة وبسرعة متوسطة تقدر بحوالي  $120^\circ\text{C}/\text{min}$ .



الشكل IV - 34 مقارنة بين الوقت المستغرق للمعالجة بموجات الميكرو والمعالجة التقليدية

يظهر الشكل IV-34 مقارنة بين الوقت المستغرق للمعالجة بموجات الميكرو والمعالجة التقليدية، حيث نلاحظ أن المعالجة بموجات الميكرو استغرقت جزء من الوقت المستغرق في المعالجة التقليدية وبطاقة (درجة حرارة) أقل. حيث أن الوقت المستغرق في جميع مراحل المعالجة بموجات الميكرو يمثل أقل من جزء من 17 جزء من الوقت المستغرق في الطريقة التقليدية.



الشكل IV - 35 تغيرات الكثافة النسبية لعينات  $(1-x) BaTiO_3+x Fe_2O_3$  ملبدة بطريقتين

نلاحظ من الشكل IV - 35 أن الكثافة ترتفع بزيادة التركيز من أكسيد الحديد المضاف قد يعود هذا التأثير الإيجابي لأكسيد الحديد على زيادة نسبة التليد إلى تشكل طور غني بالحديد وهذا في المعالجة بموجات الميكرو والمعالجة التقليدية لكن مع ملاحظة أن الزيادة في نسبة التليد تكون أكبر في المعالجة بموجات الميكرو عنها في المعالجة التقليدية حيث نلاحظ أن نسبة التليد تكون في العينات ذات 7 % من أكسيد الحديد والمعالجة بموجات الميكرو أقل منها في العينات المعالجة بالطريقة التقليدية ذات نفس النسبة لترتفع في العينات ذات 15 و 20 % من أكسيد الحديد والمعالجة بموجات الميكرو وتصبح أعلى من التي تمت معالجتها بالطريقة التقليدية ولنفس النسبتين وهذا ما يوضح التأثير الإيجابي لأكسيد الحديد في المعالجة بموجات الميكرو. نتيجة لخواصه العزلية العالية ( ثابت العزل وزاوية فقدان العزلية).

من خلال الشكلين IV-34 و 35 يمكن أن نقول أن التليد بموجات الميكرو كان أفضل من التليد بالطريقة التقليدية خاصة من أجل النسبتين 15 و 20 % من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  كما أنه استغرق جزء من الوقت ومن الطاقة مقارنة بالطريقة التقليدية.

الجدول IV-14 الكثافة النسبية لمختلف العينات المدروسة

الكثافة النسبية (%)	تركيز $Fe_2O_3$ (مول %)	زمن المعالجة	درجة حرارة التليد	نوع المعالجة
80,81	7	20 دقيقة	1200 م°	موجات الميكرو
89,15	15			
86,68	20			
83,77	7	ساعتين	1300 م°	تقليدية
88,4	15			
85,17	20			

الأشكال IV-36 ، 37 و 38 توضح منحنيات انعراج الأشعة X لعينات تيتانات الباريوم BaTiO<sub>3</sub> مضاف إليه نسب مختلفة Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ، المنحنيات توضح أن العينات تحتوي على الأقل، على ثلاث أطوار أخرى تحوي الحديد [ 57 ] بالإضافة إلى طور تيتانات الباريوم ، لكن لم تتمكن من تحديد طبيعة هذه الأطوار بواسطة بطاقات ASTM و JCPDF .

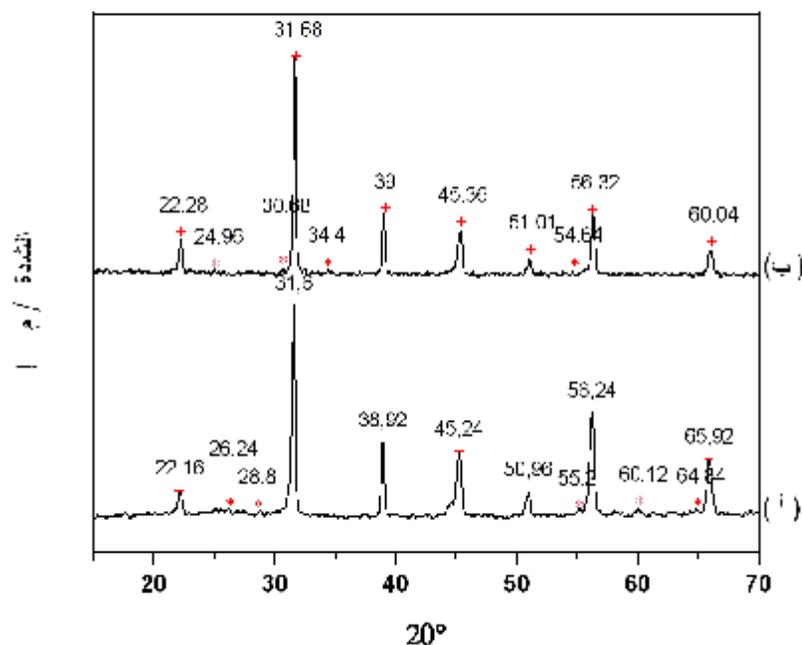
نلاحظ في العينات التي تحتوي على 07 % من أكسيد الحديد Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> أنها لا تظهر خطوط ذات شدة عالية توافق أطوار جديدة ولكن تظهر آثار لهذه الخطوط (\*) وهذا في الطريقتين.

أما العينات التي تحتوي على 15 % من أكسيد الحديد Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> فنلاحظ خطوط انعراج توافق أطوار جديدة غنية بالحديد عند 26.28, 38.64, 41.32, 49.12, 59.36 ° = 2θ في العينات الملبدة بموجات الميكرو. أما العينات الملبدة بالطريقة التقليدية فنلاحظ خطوط انعراج جديدة توافق أطوار غنية بالحديد عند 29.48, 34.24, 47.56 ° = 2θ

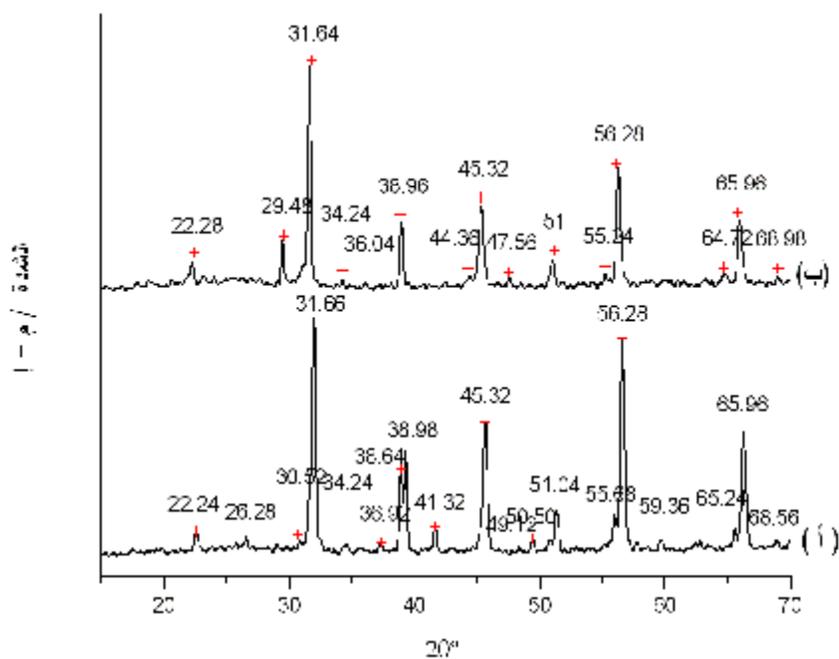
نلاحظ كذلك في العينات التي تحتوي على 20 % من Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> خطوط انعراج توافق أطوار جديدة غنية بالحديد عند 25.88, 34.08, 37.88, 40.84 ° = 2θ في العينات الملبدة بموجات الميكرو. أما العينات الملبدة بالطريقة التقليدية فنلاحظ خطوط انعراج جديدة توافق أطوار غنية بالحديد عند

28.64, 34.2, 37.2, 40.38 ° = 2θ لكن شدة هذه الخطوط ضعيفة نسبياً ، قد يعود ذلك إلى تبخر

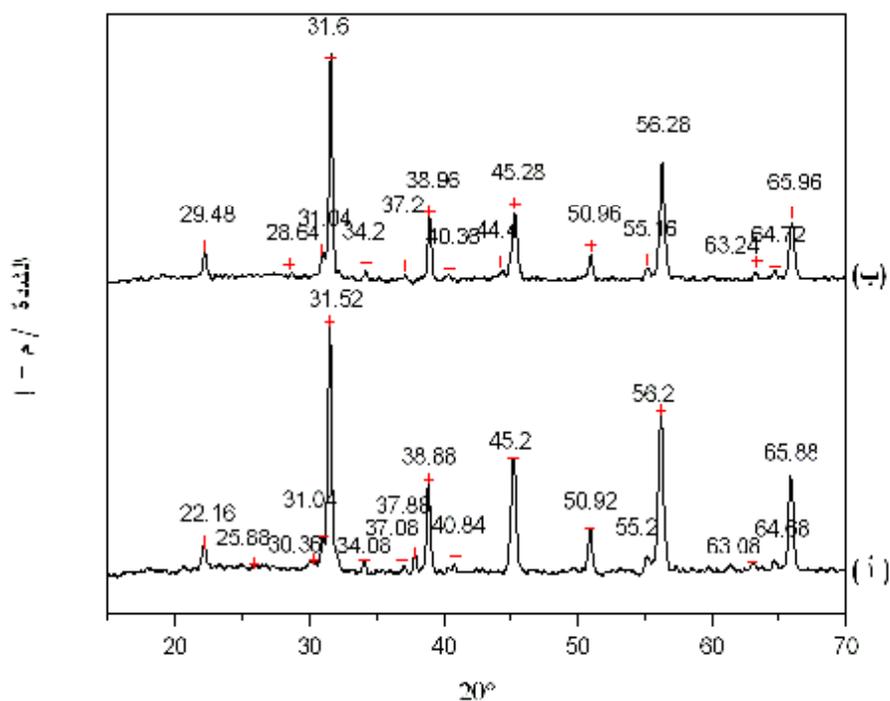
لطور أو لعدة أطوار غنية بالحديد عندما نرفع من نسبة أكسيد الحديد Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> المضافة إلى 20 % .  
عموماً يمكن ملاحظة أن الخطوط التي توافق الأطوار الجديدة في العينات الملبدة بموجات الميكرو كانت ذات شدة عالية وبعدها أكبر مقارنة بالعينات المعالجة بالطريقة التقليدية. كما نلاحظ اختلاف في هذه الخطوط مما يعني أن الأطوار التي تتشكل في العينات الملبدة بموجات الميكرو تختلف عن المتشكلة في العينات الملبدة بالطريقة التقليدية.



الشكل IV-36 طيف انعراج الأشعة السينية لـ  $\text{BaTiO}_3$  مضاف إليه 07 % مول من  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  وملبدة بـ (أ) موجات الميكرو (ب) الطريقة التقليدية



الشكل IV-37 طيف انعراج الأشعة السينية لـ  $\text{BaTiO}_3$  مضاف إليه 15 % مول من  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  وملبدة بـ (أ) موجات الميكرو (ب) الطريقة التقليدية



الشكل 37-IV طيف انعراج الأشعة السينية للـ  $BaTiO_3$  مضاف إليه 20 % مول من  $Fe_2O_3$  وملبدة بـ (أ) موجات الميكرو (ب) الطريقة التقليدية

## IV- 8- 1- 2- دراسة الخواص العزلية

## IV- 8- 1- 2- 1- دراسة ثابت العزل النسبي

تغيرات قيم ثابت العزل مع درجة الحرارة ( الشكل IV- 39) في مختلف العينات ، توضح أن ثابت العزل يرتفع بزيادة نسبة أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  المضافة، ونلاحظ وجود قمتين في مختلف المنحنيات الأولى توافق درجة حرارة كوري الفيروكهربائية، أما الثانية فتوافق درجة حرارة كوري المغناطيسية. [57] هذه الأخيرة توضح أنه هناك تشكل لأطوار جديدة غنية بالحديد، وهذا في جميع العينات.

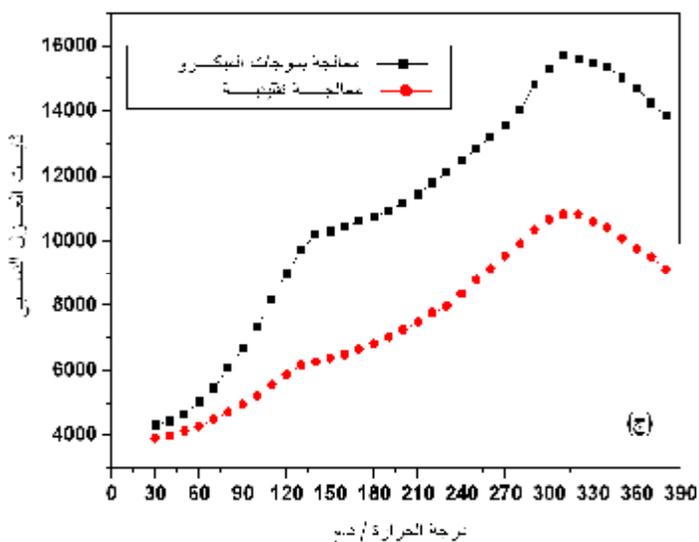
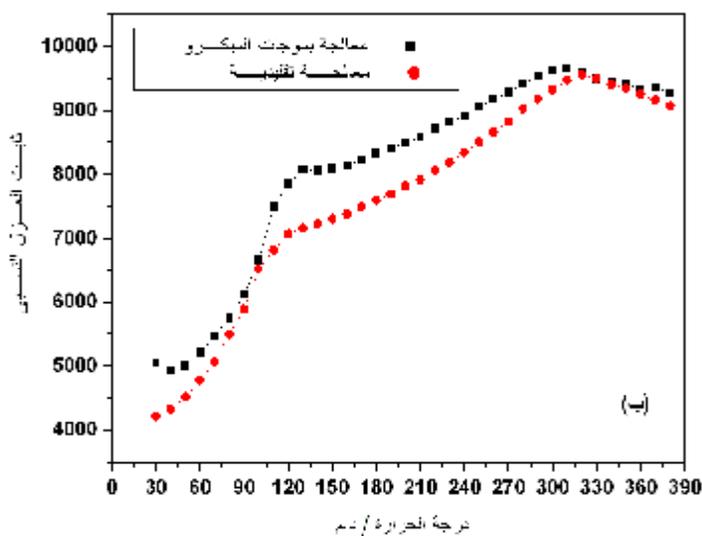
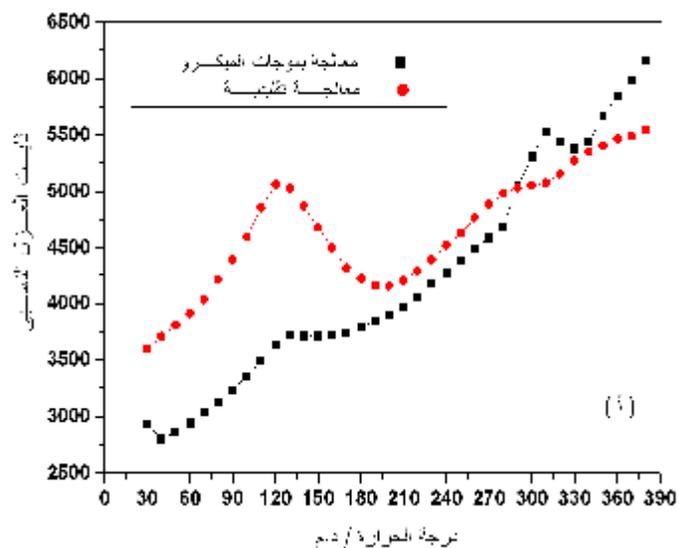
نلاحظ أن ثابت العزل في العينات المحتوية على 07 % من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  والملبدة بالطريقة التقليدية أعلى من ثابت العزل في العينات الملبدة بموجات الميكرو. كما يمكن ملاحظة في العينات المحتوية على 07 % من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  والملبدة بالطريقة التقليدية، أن القمة الموافقة لدرجة كوري الفيروكهربائية تظهر بشكل جيد، في حين أن القمة الموافقة لدرجة حرارة كوري المغناطيسية لا تظهر بشكل واضح.

لكن في العينات المحتوية على 15% من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  نلاحظ أن ثابت العزل يكون أكبر في العينات المعالجة بموجات الميكرو مقارنة بالعينات المعالجة بالطريقة التقليدية.

كما تظهر قمتان، القمة الأولى موافقة لدرجة كوري الفيروكهربائية عند 130 م° أما القمة الثانية الموافقة لدرجة كوري المغناطيسية فكانت عند 310 م° هذا في العينات الملبدة بموجات الميكرو ، أما العينات الملبدة بالطريقة التقليدية فنجد أن القمة الموافقة لقيمة كوري الفيرو كهربائية كانت عند 120 م° أما الثانية الموافقة لدرجة كوري المغناطيسية فكانت عند 320 م°.

أما العينات المحتوية على 20% من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  نلاحظ كذلك أن ثابت العزل يكون أكبر في العينات المعالجة بموجات الميكرو ،مقارنة بالعينات المعالجة بالطريقة التقليدية.

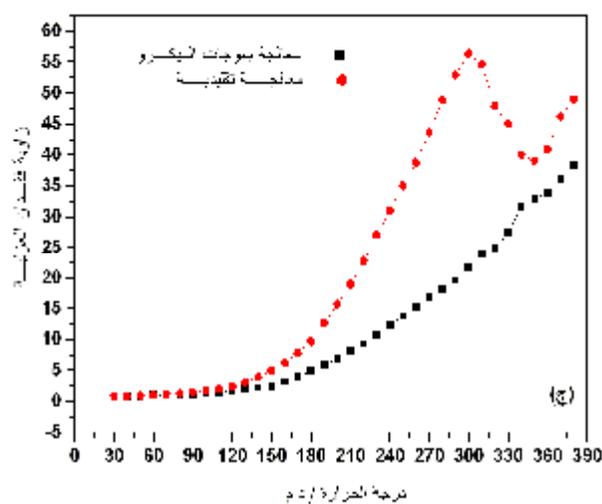
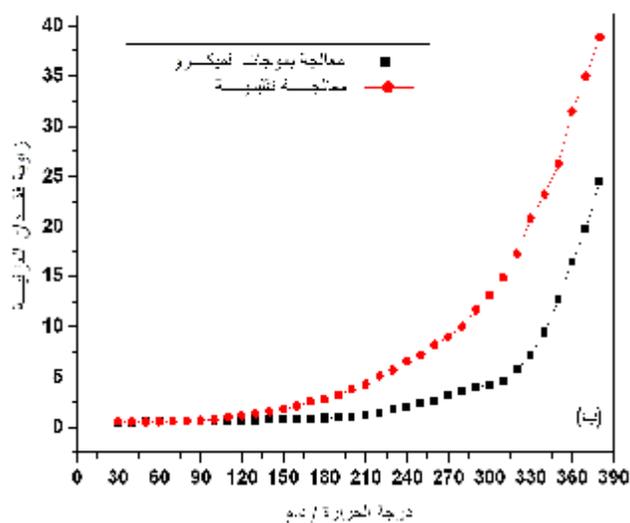
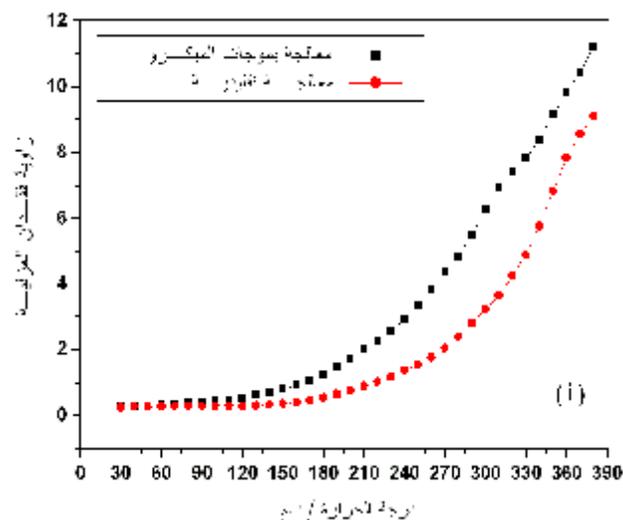
كما تظهر قمتان، القمة الأولى موافقة لدرجة كوري الفيروكهربائية عند 140 م° أما القمة الثانية الموافقة لدرجة كوري المغناطيسية فكانت عند 310 م°، هذا في العينات الملبدة بموجات الميكرو ، أما العينات الملبدة بالطريقة التقليدية، فنجد أن القمة الموافقة لقيمة كوري الفيرو كهربائية كانت عند 130 م° أما الثانية الموافقة لدرجة كوري المغناطيسية فكانت عند 310 م°.



الشكل IV-39 تغيرات ثابت العزل بدلالة درجة الحرارة (1kHz) للـ  $BaTiO_3$  مضاف إليه نسب مختلفة من  $Fe_2O_3$  (أ) 07 % مول (ب) 15 % مول (ج) 20 % مول

## IV- 8- 1- 2-2 دراسة زاوية فقدان العزلية

تظهر المنحنيات الممثلة لزاوية فقدان العزلي ( الشكل IV-40) أن  $\tan \delta$  ترتفع مع ارتفاع نسبة أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  المضافة وهذا في الطريقتين. النتائج توضح كذلك أن زاوية فقدان العزلية، تكون في العينات ذات 07 % من  $Fe_2O_3$  و الملبدة بموجات الميكرو أكبر منها ،في العينات الملبدة بالطريقة التقليدية وقد يعود ذلك أساسا لإرتفاع نسبة الفراغات في العينات الملبدة بموجات الميكرو ، مقارنة بالعينات الملبدة بالطريقة التقليدية، ويعود انخفاض كثافة العينات الملبدة بموجات الميكرو إلى زمن التسخين القصير نسبيا. أما العينات المحتوية 15 % و 20 % من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  تظهر أن زاوية فقدان العزلية، تكون في العينات الملبدة بموجات الميكرو، أصغر منها في العينات الملبدة بالطريقة التقليدية، ويعود ذلك إلى انخفاض نسبة الفراغات في العينات الملبدة بموجات الميكرو، مقارنة بالعينات الملبدة بالطريقة التقليدية ،هذا الانخفاض يمكن تفسيره على أن المعالجة بموجات الميكرو، تنشط التليد وترفع من نسبته وهذا من أجل النسب العالية من أكسيد الحديد  $Fe_2O_3$  (15 % و 20 % مول) وبذلك تخفض من نسبة الفراغات هذه الأخيرة تعتبر كطور غير عازلي وجودها يرفع من فقدان العزلي .



الشكل IV-40 تغيرات  $\tan \delta$  بدلالة درجة الحرارة (1khz) للـ  $BaTiO_3$  مضاف إليه نسب مختلفة من  $Fe_2O_3$  (أ) 07 % مول (ب) 15 % مول (ج) 20 % مول

## الخلاصة

قمنا من خلال هذا العمل ، بتعديل وأقلمة فرن موجات ميكرو منزلي، يشتغل بتردد (2.45 GHz)، ليسمح ببلوغ درجات حرارة عالية. تتألف منظومة التسخين أساسا من سسيبتور (عنصر التسخين)، ونظام عزل حراري. لقد قمنا بصناعة عنصر التسخين (سسيبتور)، على شكل أنبوب أسطوانى، من مادة كربيد السلكون الصناعي (SiC) أساسا، مع تحسين خصائصها (من أجل تزواج أحسن مع موجات الميكرو)، بإضافة نسب مختلفة من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ )، (2 %، 5 %، 10 %) ودراسة تأثير هذه الإضافات على تسخين السسيبتور، وعلى خصائصه العزلية المتمثلة في ثابت العزل النسبي، و زاوية فقدان العازلية، ومعامل فقدان العازلي، حيث أن النتائج المتحصل عليها، تظهر أن درجة حرارة التسخين بلغت حوالي 1500 °م خلال 10 دقائق بالنسبة لعنصر التسخين المحضر من الـ SiC الصناعي المطعم بـ 5 % من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ )، وأستطاع نفس عنصر التسخين، أن يصل إلى أكثر من 1500 °م خلال أقل من 6 دقائق، عند تغيير نظام العزل الحراري بنظام عزل آخر، وبلغ ثابت العزل النسبي 1823 وزاوية فقدان العازلية إلى 2.05 عند درجة حرارة الغرفة. في حين كانت النتائج بالنسبة لعنصر التسخين المحضر من الـ SiC الصناعي فقط، قد بلغت 1268 °م خلال 10 دقائق، مع وجود بقع ساخنة حتى الوصول إلى هذه الدرجة. كما أن ثابت العزل النسبي كان 135 وزاوية فقدان العازلية كانت 0.158 عند درجة حرارة الغرفة. لقد بينت النتائج أن التسخين بموجات الميكرو، لعناصر التسخين مرتبط بشكل أساسي بالخواص العزلية لهذه الأخيرة.

قمنا كذلك بدراسة العديد من الأبعاد، التي يمكن لها أن تتحكم وتؤثر في التسخين بموجات الميكرو بطريقة أو بأخرى ككثافة عنصر التسخين، تأثير أوسع وسمك نظام العزل الحراري، التغذية بإستطاعات خروج مختلفة لموجات الميكرو، وتدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين (توزيع الحقل الكهرومغناطيسي). لقد أثبتت دراسة هذه الأبعاد، أنه من أجل الوصول إلى تسخين فعال ومتجانس للمواد يجب بالإضافة إلى الخواص العزلية الجيدة، المناسبة للمعالجة بموجات الميكرو، يجب تطبيق استطاعة خروج عالية نسبيا (شدة حقل فعال)، مع تصميم جيد لنظام العزل الحراري وكذلك العمل في مطبق يكون توزيع الحقل الكهرومغناطيسي فيه متجانس.

في الأخير قمنا باستغلال منظومة التسخين، في تلييد عينات من تيتانات الباريوم ( $BaTiO_3$ ) مضاف إليها ثلاث نسب مختلفة (7 %، 15 %، 20 %) من أكسيد الحديد ( $Fe_2O_3$ )، عند 1200 °م لمدة 20 دقيقة، لنقوم بدراسة خصائص المركب الناتج (الكثافة، الأطوار، الخواص العزلية) ومقارنتها مع النتائج التي تحصلنا عليها بالمعالجة التقليدية عند 1300 °م لمدة ساعتين، حيث أثبتت النتائج أن المعالجة

بموجات الميكرو، يعطي خواص جيدة ( كهربائية وميكانيكية) للمركب  $BaTiO_3-Fe_2O_3$  ، مقارنة بالطريقة التقليدية وهذا من أجل النسب العالية من  $Fe_2O_3$  المضافة ( 15 % و 20 %).

## دراسة التسخين بأمواج الميكرو ( 2.45 GHz ) ، تطبيق في تحضير الأكاسيد

### ملخص

قمنا من خلال هذا العمل، بتعديل وأقلمة فرن موجات ميكرو منزلي يشتغل بتردد (GHz) 2.45، ليمسح ببلوغ درجات حرارة عالية. تتألف منظومة التسخين أساسا، من سسبيكتور (عصر التسخين) ونظام عزل حراري. لقد قمنا بصناعة عنصر التسخين (سسبيكتور)، على شكل أنبوب أسطواني من مادة كربيد السلكون الصناعي (SiC) أساسا، مع تحسين خصائصها (من أجل تزواج أحسن مع موجات الميكرو) بإضافة نسب مختلفة من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ )، (2 % ، 5 % ، 10 %) ودراسة تأثير هذه الإضافات على تسخين السسبيكتور وعلى خصائصه العزلية، المتمثلة في ثابت العزل النسبي، و زاوية فقدان العازلية، حيث أن النتائج المتحصل عليها، تظهر أن درجة حرارة التسخين بلغت حوالي 1500 م° خلال 10 دقائق بالنسبة لعنصر التسخين المحضر من الـ SiC الصناعي المطعم بـ 5 % من أكسيد المنغنيز ( $MnO_2$ ) وأستطاع نفس عنصر التسخين، أن يصل إلى أكثر من 1500 م° خلال أقل من 6 دقائق، عند تغيير نظام العزل الحراري بنظام عزل آخر. وبلغ ثابت العزل النسبي 1823 وزاوية فقدان العازلية إلى 2.05 عند درجة حرارة الغرفة، في حين كانت النتائج بالنسبة لعنصر التسخين المحضر من الـ SiC الصناعي فقط، قد بلغت 1268 م° خلال 10 دقائق، مع وجود بقع ساخنة حتى الوصول إلى هذه الدرجة. كما أن ثابت العزل النسبي كان 135 وزاوية فقدان العازلية كانت 0.158 عند درجة حرارة الغرفة. لقد بينت النتائج أن التسخين بموجات الميكرو لعناصر التسخين مرتبط بشكل أساسي بالخواص العزلية لهذه الأخيرة.

قمنا كذلك بدراسة العديد من الأبعاد، التي يمكن لها أن تتحكم وتؤثر في التسخين بموجات الميكرو، بطريقة أو بأخرى ككثافة عنصر التسخين، تأثير أتساع وسمك نظام العزل الحراري، التغذية بإستطاعات خروج مختلفة لموجات الميكرو، وتدرج درجة الحرارة داخل عنصر التسخين (توزيع الحقل الكهرومغناطيسي). في الأخير تم استغلال منظومة التسخين، في تلييد عينات من تيتانات الباريوم ( $BaTiO_3$ ) مضاف إليها ثلاث نسب مختلفة (7 % ، 15 % ، 20 %) من أكسيد الحديد ( $Fe_2O_3$ )، عند 1200 م° لمدة 20 دقيقة، لنقوم بدراسة خصائص المركب الناتج (الكثافة، الأطوار، الخواص العزلية)، ومقارنتها مع النتائج التي حصلنا عليها بالمعالجة التقليدية عند 1300 م° لمدة ساعتين، حيث أثبتت النتائج أن المعالجة بموجات الميكرو، تعطي خواص جيدة (كهربائية وميكانيكية) للمركب  $BaTiO_3-Fe_2O_3$  مقارنة بالطريقة التقليدية وهذا من أجل النسب العالية من  $Fe_2O_3$  المضافة (15 % و 20 %).

---

**الكلمات المفتاحية:** موجات الميكرو ، عنصر التسخين بموجات الميكرو ، سسبيكتور ، العزل الحراري ، اختبار التسخين ، الخواص العزلية ،  $BaTiO_3-Fe_2O_3$  .

## The study of 2, 45 GHz microwave heating, application for the elaboration of oxides

### Abstract

In this work we have improved, and adapted a domestic microwave oven working under 2.45 GHz, to lead us to reach high temperatures. The heat system is constituted essentially with susceptor (heating element) and heat insulating system.

We have made the heating element (susceptor) in a cylinder shape from industrial silicone carbide material (SiC) essentially, with improving his characteristics ( for better interaction with microwave ) by adding different rates of manganese oxide ( $\text{MnO}_2$ ) ( 2 % , 5 % , 10 % ), and study the influence of this adds on susceptor heating and on his dielectric proprieties which are relative dielectric constant and dielectric loss angle .

The results obtained show that the temperature of heating reaches nearly  $1500^\circ\text{C}$  in 10 minutes in the case of heating element prepared from industrial SiC doped with 5 % of manganese oxide and that the same heating element is able to reach more than  $1500^\circ\text{C}$  in less than 6 minutes by changing the heat insulating system by another, where we find the relative dielectric constant reaches 1823 and the dielectric loss angle reaches 2.05, under room temperature (  $30^\circ\text{C}$  ). in the case of the heat element is prepared from industrial SiC only ,we reach just  $1268^\circ\text{C}$  in 10 minutes with the existence of heat spots where reaching this temperature , the relative dielectric constant where 135 And the dielectric loss angle where 0.158 Under room temperature.

We have also studied many dimensions which can control and influence on microwave heating by a way or another like heating element density, influence of the wide and thickness of heating insulation system, using supply with different power out and ranging temperature into heating element.

In the end the heating system where used to sinter simples from Barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ ) adding to it 3 different rates (7 % , 15 % , 20 % ) of iron oxide (  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ) at  $1200^\circ\text{C}$  along 10 minutes, to study the characteristics ( density , phases , dielectric proprieties ) of the resulting compound and compare it with the traditional processing at  $1300^\circ\text{C}$  along 2 hours.

---

**Key words :** Microwave , Microwave heating element, Susceptor , Insulation system , dielectric proprieties ,  $\text{BaTiO}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$

# Etude du chauffage par micro-ondes ( 2 ,45 GHz ), Application à l'élaboration des oxydes

## Résumé

Nous avons a travers ce travail améliorer et adapter un four a micro-onde qui fonctionne sous une fréquence de 2 ,45 GHz , pour nous permettre d'atteindre de hautes températures .le système de chauffage ce constitue essentiellement d'un Sucepteur (élément de chauffage) et un système d'isolation thermique.

Nous avons fabriquer l'élément de chauffage (Sucepteur) sous une forme cylindrique avec essentiellement du carbide silicone industriel (SiC) , avec l'amélioration de ces caractéristiques (pour une meilleure interaction avec les micro-ondes) par l'ajout de différent taux d'oxyde de manganèse ( $MnO_2$ ) ( 2 % , 5 % , 10 % ) et l'étude de l'effet de ces ajouts sur l'échauffement du sucepteur et sur ses propriété dielectrique qui ce résume a la constante diélectrique et l'angle de perte diélectrique.

Les résultats obtenus montre que la température du chauffage atteint presque 1500° C en 10 minutes dans le cas ou l'élément de chauffage est préparé avec du SiC industriel dopé avec 5% d'oxyde de manganèse ( $MnO_2$ ) et que ce même élément a pu dépasser les 1500° C en moins de 6 minutes quant on change le système d'isolation thermique par un autre, on trouve la constante diélectrique relative a 1823 et l'angle de perte diélectrique a 2.05 Sous une température ambiante (30 °C) .Dans le cas ou l'élément de chauffage était préparé seulement avec du SiC industriel on atteint seulement 1268°C en 10 minutes, avec l'existence de taches chaudes on atteignant cette température, dans ce cas on trouve la constante diélectrique relative a 135 et l'angle de perte diélectrique a 0.158 Sous une température ambiante.

Nous avons aussi étudier différentes dimensions qui peuvent contrôler et influencer sur le chauffage par micro-ondes par une façon ou une autre comme la densité de l'élément de chauffage, l'effet de l'élargissement et l'épaisseur du système d'isolation thermique, l'alimentation par différentes puissances d'entrée pour les micro-ondes, et l'échelonnement de la température a l'intérieur de l'élément de chauffage (distribution du champ électromagnétique).

A la fin le système de chauffage a était exploité pour sinteriser des échantillons de Titanate de Baryum ( $BaTiO_3$ ) que nous leur avons ajouter trois taux différent d'oxyde de fer (  $Fe_2O_3$  ) ( 7 % , 15 % , 20 % ) , sous 1200° C pendant 20 minutes , pour ensuite étudier les caractéristiques (densité , phases , propriétés diélectrique ) du composant qui en résulte et les comparer avec les résultats obtenus par le traitement conventionnel sous 1300° C pendant 2 heures .

---

**Mots clés :** Micro-ondes, Elément Chauffant à Micro-ondes, Suscepteur , Système d'isolation thermique , propriété diélectrique ,  $BaTiO_3$ - $Fe_2O_3$