

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة منتوري - قسنطينة -
كلية العلوم
قسم الفيزياء

رقم التسجيل:.....

السلسلة:.....

أطروحة
مقدمة لنيل شهادة
الدكتوراه في العلوم
في الفيزياء

تخصص: الخزفيات

العنوان

تطوير منظومة تسخين بالميكرويف و استخدامها في تلييد المواد الخزفية

من طرف

نورالدين كربوعة

نوقشت بتاريخ: 2011 /07 /06

أمام أعضاء لجنة المناقشة:

رئيسا	قسنطينة	جامعة منتوري	أستاذ	سليمان عاشور
مقرر	قسنطينة	جامعة منتوري	أستاذ	عبد الحميد حرابي
ممتحنا	سطيف	جامعة فرحات عباس	أستاذ	كمال لوصيف
ممتحنا	سطيف	جامعة فرحات عباس	أستاذ	حسين عصماني
ممتحنا	قسنطينة	جامعة منتوري	أستاذ	صلاح الدين برامة
ممتحنا	جيجل	جامعة	أستاذ محاضر-أ	فرحات بوزرارة

كلمة شكر

الحمد لله وحده وبعد ،

من لا يشكر الناس لا يشكر الله.

أود أن أتقدم بمعاني التقدير و الاحترام لكل من ساهم في إنجاز هذا العمل المتواضع، أخص بالذكر الأستاذ عبد الحميد حرابي لتفضله باقتراحه موضوع البحث و إشرافه على بلوغ هذا العمل نهايته.

كذلك أتوجه بالشكر للأستاذ سليمان عاشور على اهتمامه بالموضوع و تتبعه إياه و كذلك لتفضله بقبول ترؤس لجنة المناقشة.

كما أتقدم بالشكر للأستاذ نوصيف كمال و عصماني حسين من جامعة سطيف و الاستاذ برامة صلاح الدين لاهتمامهم بموضوع الأطروحة و موافقتهم على المشاركة في لجنة المناقشة.

كما أتوجه بالشكر للأستاذ بوزرارة فرحات من جامعة جيجل لاهتمامه بالموضوع و موافقته على المشاركة في لجنة المناقشة.

أود أن أتوجه بالشكر كذلك للأستاذة Monika Willert Porada المتخصصة في معالجة المواد من جامعة Bayreuth-Bavaria بألمانيا و الأستاذ Jon Binner من جامعة Loughborough ببريطانيا و الأستاذ Michael Vollmer من معهد الفيزياء (IOP) بـ Fachhochschule Brandenburg والأستاذ T. Olorunyolemi من جامعة Mary Land بالولايات المتحدة و ذلك للنصائح و التوجيهات و بعض المراجع المهمة التي أفادت هذا البحث.

في الأخير أتوجه بالشكر للزملاء الذين ساعدوا في إنجاز هذا العمل، **نشكرا جزيلاً جميعاً.**



الفهرس

1 مقدمة عامة

الفصل الأول: نظرية المعالجة بالميكرويف

4	1-I مقدمة
6	2-I تعريف موجات الميكرو
7	3-I النظرية الكهرومغناطيسية
7	1.3-I منابع موجات الميكرو
7	1.1.3-I المغنترونات
9	2.1.3-I أنابيب تجوال الموجة
11	2.3-I خطوط التوصيل
11	1.2.3-I ماص الاشعاع المنعكس
11	2.2.3-I المزوجات الإتجاهية
11	3.2.3-I المؤلفات (أجهزة المؤلفات)
11	3.3-I مطبقات موجات الميكرو وأنظمة المعالجة
12	1.3.3-I المطبق أحادي النمط
14	2.3.3-I المطبقات متعددة الأنماط
17	4-I تفاعلات موجة ميكرو/مواد
18	1.4-I الخواص العزلية للمادة
18	2.4-I الإسترخاء العزلي
23	3.4-I تحول الطاقة
26	4.4-I قياس الخواص العزلية
27	5-I الخزفيات و أنسجة الخزفيات المركبة
27	1.5-I سلوك المادة
28	2.5-I معالجة الخزفيات
32	6-I ملخص

الفصل الثاني: نظام التوتر العالي و سلامة طاقة الميكرويف

II نظام التوتر العالي

33	1-II مقدمة
33	2-II أنبوب المغنترون
34	1.2-II الأنود
35	2.2-II الكاثود
35	3.2-II الهوائي
35	4.2-II الحقل المغناطيسي
35	3-II أساس عمل المغنترون
35	1.3-II تأثير الحقل المغناطيسي
37	2.3-II دارات المؤلفات

39	..... 3.3-II موجه الموجة
39	..... 4.3-II مكثفات التردد الراديوي
40	..... 5.3-II زعانف التبريد
41	..... 6.3-II مدة حياة المغنطرون
41	..... 4-II المحولات
41	..... 1.4-II المحول عالي التوتر
42	..... 5-II سلامة طاقة الميكرويف
42	..... 1.5 مقدمة
43	..... 2.5 مدى خطورة الميكرويف
43	..... 3.5 قياس الميكرويف
44	..... 4.5 معايير القياس السوفيتية
44	..... 5.5 مستويات التعرض الأمانة
46	..... 6.5 البعد الآمن
47	..... 7.5 كلمة أخيرة

الفصل الثالث: تطوير منظومة تسخين بالميكرويف

	..... 1-III عنصر التسخين بالميكرويف
48	..... 1-III عنصر تسخين بالميكرويف
49	..... 2-III عنصر تسخين بمادة الـ SiC فقط
50	..... 3-III كربايد السيلكون (SiC)
50	..... 1.3-III الخواص الفيزيائية
51	..... 2.3-III البنية البلورية
	..... 2-III نظام العزل الحراري
54	..... 1.2-III أهمية نظام العزل الحراري
54	..... 2.2-III المميزات الأساسية لنظام العزل الحراري
55	..... 3.2-III عيوب العازل الحراري القديم المصنوع من الكاولان
55	..... 4.2-III العازل الحراري الجديد المطور
56	..... 5.2-III أقسام العازل الحراري
56	..... 6.2-III مراحل تصميم العازل الحراري
58	..... 7.2-III التدرجات الحرارية العكسية
	..... 3-III نظام التبريد
59	..... 1.3-III أهمية نظام التبريد في المعالجة بالميكرويف
60	..... 2.3-III عمل نظام التبريد
61	..... 3.3-III طريقة تركيب نظام التبريد
	..... 4-III نظام التحكم في درجة الحرارة
62	..... 1.4-III جهاز ضبط / برمجة درجة الحرارة الالكتروني
63	..... 1.1.4-III قسم البرمجة

63	..... III-2.1.4 قسم ضبط درجة الحرارة
65	..... III-2.4 حامل المزدوج الحراري
67	..... III-3.4 دائرة قاسم التوتر VDC
67	..... خلاصة

الفصل الرابع: دراسات تجريبية على التسخين بالميكرويف

1-IV دراسة تسخين مادة الـ SiC بدون إضافات باستعمال موجات الميكرويف

68	..... 1 - تأثير حجم حبيبات الـ SiC على التسخين بالميكرويف
70	..... 2 - تأثير قطر العازل الحراري على تسخين الـ SiC
74	..... 3 - الخلاصة

2-IV دراسة تأثير توزيع الاستطاعة/ الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة متعددة الأنماط على التسخين بالميكرويف

75	..... 1 - ملخص العمل المنجز
75	..... 2 - مقدمة
76	..... 3 - الطرق التجريبية
77	..... 4 - النتائج و مناقشتها
82	..... 5 - الخلاصة

3-IV دراسة تأثير سمك و اتجاه العازل الحراري على التسخين بالميكرويف

83	..... 1 - ملخص العمل المنجز
83	..... 2 - مقدمة
86	..... 3 - الطرق التجريبية
87	..... 4 - النتائج و مناقشتها
87	..... - تأثير سمك العازل الحراري
93	..... - تأثير توجه العازل الحراري
95	..... 5 - الخلاصة

الفصل الخامس: تطبيقات منظومة التسخين بالميكرويف

1-V تلييد مادة الملائت

96	..... 1 - ملخص العمل المنجز
96	..... 2 - مقدمة
96	..... 3 - صناعة و تلييد الملائت
100	..... 4 - خلاصة

101	..... 2-V تلييد مادة العظم (الهيدروكسي أبتايت)
101	..... 1 - ملخص العمل المنجز
101	..... 2 - مقدمة
102	..... 3 - الطريقة التجريبية
103	..... 4 - نتائج التلييد و مناقشتها
104	..... 5 - خلاصة
105	..... 3-V تلييد مادة الديوبسايت
105	..... 1 - ملخص العمل المنجز
105	..... 2 - مقدمة
105	..... 3 - الطرق التجريبية
107	..... 4 - نتائج تلييد الديوبسايت
108	..... 5 - خلاصة
109	..... خلاصة عامة
111	..... المراجع

مقدمة عامة

يعتبر فرن الميكرويف (موجات الميكرو) أحد التطبيقات المهمة في أغلبية المطابخ المنزلية. تمثل أولى الفوائد، مقارنة بطرق الطبخ التقليدي، في أزمنة طهي أسرع و ادخار في الطاقة. وإن كان استعمال موجات الميكرو في طهي الطعام شائعاً، فتطبيق هذه التقنية بغرض معالجة المواد يعتبر تطوراً جديداً. إن استعمال طاقة موجات الميكرو في معالجة المواد يفضي إلى المحاسن ذاتها و المتمثلة في تقليص أزمنة المعالجة و الاقتصاد في الطاقة.

تحول الطاقة، في المعالجة الحرارية التقليدية، إلى المادة من خلال سطوحها عبر الحمل و النقل و الإشعاع الحراري. على العكس من هذا، تمون موجات الميكرو المواد بالطاقة مباشرة من خلال تفاعل جزياتها مع الحقل الكهرومغناطيسي. يتم في التحويل الحراري نقل الحرارة بضرورة وجود تدرجات حرارية، لكن في التسخين بموجات الميكرو، الطاقة الكهرومغناطيسية هي التي تحول إلى طاقة حرارية. هذا الاختلاف في الطريقة التي يتم التزود بها بالطاقة ينتج عنه العديد من الفوائد في معالجة المواد باستعمال موجات الميكرو. كون موجات الميكرو تتمتع بمقدرة على التوغل في المواد و إيداع الطاقة بها، يمكن للحرارة أن تتولد في حجم المادة بأكملها. فالتحول الطاقوي في هذه الحالة لا يعتمد على انتشار الحرارة من السطوح، وبالتالي من الممكن بلوغ تسخين متجانس و سريع في المواد السميكة. بما أن موجات الميكرويف تنقل الطاقة إلى حجم المادة برمته في أن واحد فإنه يصير بالإمكان تقليص زمن المعالجة وتحسين الجودة.

انطلاقاً مما سبق، تم وضع و تسطير الهدف الأساس من هذه الدراسة المتمثل في تطوير منظومة تسخين تكون أكثر كفاءة تعمل بالميكرويف عند التردد 2.45 GHz قادرة على بلوغ درجات حرارة عالية بكفاية تسمح عملياً بمعالجة المواد الخزفية.

جاءت الأطروحة في ثلاثة أقسام:

القسم الأول نظري اشتمل على فصلين (الفصل الأول و الثاني)، تم في الفصل الأول التطرق إلى ماهية موجات الميكرويف و النظريات المتعلقة بطرق إنتاجها إلى جانب التجارب القديمة و الحديثة التي أجراها الباحثين في معالجة المواد على العموم و الخزفيات على الخصوص باستعمال الميكرويف، مع عرض لأهم النتائج التي توصلوا إليها مقارنة مع طرق المعالجة التقليدية الأخرى. في الفصل الثاني، سلط الضوء على أهم أقسام فرن الميكرويف التي تقف وراء توليد هذه الموجات و المتمثلة في نظام التوتر العالي كما ألحق به جزء مهم يتعلق بمدى خطورة إشعاع موجات الميكرويف و إمكانية التقليل منها.

القسم الثاني عملي تكنولوجياي يقع في فصلين هو الآخر (الفصل الثالث و الرابع) تم التطرق فيه إلى عملية التطوير في حد ذاتها و التي ارتكزت أساسا على أربعة محاور:

المحور الأول اشتمل على صناعة و توسيع حجم عنصر التسخين العامل بالميكرويف ليصبح باستيعاب عينات خزفية ذات قطر أكبر من **13 mm** يسهل إجراء القياسات عليها بعد معالجتها.

المحور الثاني من الفصل الثالث اشتمل على تطوير نظاما للعزل الحراري من الألومينا الليفي **fibre Al₂O₃** ذو هندسة ذات بطانة مزدوجة يتميز بسهولة تركيبه و بقدرة عالية على مقاومة الإجهاد الحراري.

المحور الثالث من الفصل الثالث يكمن في تصميم و تطوير نظاما للتحكم في درجة الحرارة يمكن برمجته بإدخال درجة الحرارة المعالجة و زمن المكوث و كذلك سرعة التسخين. مبدأه يكمن في فتح و غلق دارة التغذية للمغنترون بواسطة موصل ستاتيكي صلب ذو استطاعة عالية بوجود قاسم للتوتر عبارة عن محول كهربائي و مكثفة توتر عالي.

المحور الرابع من الفصل الثالث اشتمل على تركيب نظام خارجي للتبريد مدعما لنظام التبريد الداخلي هدفه منع مغنترون فرن الميكرويف المعدل من بلوغ درجة حرارة حرجة تتسبب غالبا في توقيف اشتغاله و حتى إتلافه. سمح نظام التبريد بتمديد أزمان المعالجة من **5 min** إلى حدود **20 min** عند مجال درجات الحرارة العالية (**1650°C - 1000°C**).

أما الفصل الرابع فتم التطرق فيه إلى جملة من الدراسات التجريبية كان الهدف منها ضبط منظومة التسخين و أفلمتها حيث تم فيه دراسة تأثير توزيع الحقل الكهرومغناطيسي في التسخين داخل مطبق متعدد الأنماط لفرن الميكرويف باستعمال منظومة التسخين المطورة حيث تم اكتشاف طريقة لتركيز حقل موجات الميكرويف في مركز عنصر التسخين و بذلك صار التسخين أكثر فعالية. اعتمدت الطريقة على إقحام اسطوانة معدنية مجوفة ذات نصف قطر يساو أو يقارب طول موجة الميكرويف العاملة المقدرة بـ **12 cm** ومحورها منطبق تماما على محور حجرة الفرن.

كما أجريت دراسة تجريبية أخرى على مدى تأثير كلا من سمك و توجه العازل الحراري المطور في التسخين بالميكرويف. حيث سمحت الدراسة بتحديد الأبعاد الثلاث و التوجه الأمثل للعازل الحراري الذي يعطي أعلى مردود في التسخين.

القسم الثالث يتمثل في الفصل الأخير (الفصل الخامس)، الذي يعتبر ثمرة الفصلين الثالث و الرابع (القسم الثاني)، تم فيه استثمار منظومة الميكرويف المطورة في المعالجة الحرارية لثلاثة أنواع من الخزفيات (منها العضوية) وهي مادة الملايت (**Mulite**) و مادة عظم البقر الطبيعي (**hydroxiapatite**) و مادة الديوبسايت

(Diopside). حيث قورنت نتائج تلييد المواد السابقة مع التلييد الكلاسيكي (التقليدي) لنفس المواد فوجدت أنها أفضل بكثير سواء من حيث مدة المعالجة التي كانت أقصر أو من حيث درجة حرارة المعالجة التي كانت أخفض و هذا باستعمال طريقة الميكرويف المقترحة في هذه الدراسة.

تنتهي الأطروحة بخلاصة عامة تستعرض فيها بإيجاز كل ما جاء في الأقسام المذكورة من تجارب و تطبيقات عملية كما أتبعته بذكر المراجع المعتمدة في هذا العمل.

أساسيات المعالجة بالميكرويف

1
الفصل

1-I مقدمة

في الثلاثين سنة التي خلت، صار فرن موجات الميكرو (الميكرويف) أحد التطبيقات المهمة في أغلبية المطابخ المنزلية. تمثل أولى الفوائد - مقارنة بطرق الطبخ التقليدي - في أزمنة طهي أقصر و ادخار في الطاقة. وإن كان استعمال موجات الميكرو في طهي الطعام شائعاً، فتطبيق هذه التقنية بغرض معالجة المواد يعتبر تطوراً جديداً نسبياً. إنّ استعمال طاقة موجات الميكرو في معالجة المواد يفضي إلى المحاسن ذاتها و المتمثلة في تقليص مدة زمن المعالجة و الاقتصاد في الطاقة.

تحوّل الطاقة، في المعالجة الحرارية التقليدية، إلى المادة - من خلال سطوحها - عبر الحمل، النقل، و الإشعاع الحراري. على العكس من هذا، تموّن موجات الميكرو المواد بالطاقة مباشرة من خلال تفاعل جزيئاتها مع الحقل الكهرومغناطيسي. في التحويل الحراري يتطلب نقل الحرارة بضرورة وجود تدرجات حرارية، لكن في التسخين بموجات الميكرو، الطاقة الكهرومغناطيسية هي التي تحوّل إلى طاقة حرارية. هذا الاختلاف في الطريقة التي يتم التزود بها بالطاقة ينتج عنه العديد من الفوائد في معالجة المواد باستعمال موجات الميكرو. كون موجات الميكرو تتمتع بمقدرة على التوغل في المواد و إيداع الطاقة بها، يمكن للحرارة أن تتولد في حجم المادة بأكملها. فالتحول الطاقوي في هذه الحالة لا يعتمد على انتشار الحرارة من السطوح، وبالتالي من الممكن بلوغ تسخين متجانس و سريع في المواد السميكة. في التسخين التقليدي يسيطر على الدورة الحرارية غالباً سرعات تسخين بطيئة يتم اختيارها للتقليل من التدرجات الحرارية الحادة التي ينتج عنها إجهادات داخل المادة. من أجل البولمر و الخزفيات، اللذان يعتبران مادتان ذاتي ناقلية حرارية منخفضة، يمكن أن ينتج عن هذا زيادة أو تقلص في أزمنة المعالجة وبالتالي غالباً ما يكون هناك توازن بين زمن المعالجة وجودة المنتج في الطريقة التقليدية. بما أنّ موجات الميكرو تنقل الطاقة إلى حجم المادة برمتها في آن واحد فإنه يصير بالإمكان تقليص زمن المعالجة وتحسين الجودة ككل [1].

إضافة إلى التسخين الحجمي، يمكن لتحويل الطاقة على المستوى الجزيئي أن يكون له ميزات إيجابية أخرى. فموجات الميكرو يمكن استعمالها في التسخين الانتقائي للمواد. إن البنية الجزيئية تؤثر في مقدرة موجات الميكرو في التفاعل مع المواد و تحويل الطاقة. عندما توصل المواد ذات الخصائص العزلية المختلفة ببعضها، تتزاوج موجات الميكرو مع المادة الأكثر فقداً لعازليتها، هذه الظاهرة المتمثلة، في التسخين الانتقائي، يمكن استغلالها في العديد من الأغراض. يضيع في اللحم التقليدي للخزفيات و البولمر زمن معتبر

و طاقة معتبرة أيضا في تسخين الحد البيني عن طريق الحمل الحراري عبر حوامل العينات. مع موجات الميكرو حد اللحم البيني يمكن أن يسخن في موضعه بدمج مادة ذات فقدان أعلى للعازلية فيه [2]. في المواد متعدّدة الأطوار، يمكن لبعض الأطوار أن تتزواج بشكل أسرع مع موجات الميكرو. فيصير بالإمكان معالجة المواد ذات بنى مجهرية جديدة عن طريق التسخين الانتقائي لأطوار مميزة.

يمكن لموجات الميكرو أيضا أن تحدث تفاعلات كيميائية لم تكن ممكنة بطريقة المعالجة التقليدية وذلك عبر التسخين الانتقائي للخزفيات. وهكذا يمكن لمواد جديدة أن تخلق [1].

قدّم العديد من الباحثين، في المراجع الحديثة، تقارير حول الظاهرة الا حرارية التي أُصطلح عليها باسم آثار موجات الميكرو. تتضمن الأمثلة على أثر موجات الميكرو الزيادة في سرعة تفاعلات الصلّد الحراري للمواد المعالجة بالراتينج (resins) أثناء تسخينها بموجات الميكرو [3] وسرعة تكثيف أسرع للخزفيات الملبّدة [4]. وإن تكن هناك مناقشات معتبرة حول وجود آثار موجات الميكرو، فإن العديد من المقالات تقدم نتائج غير متوقعة والتي لا تبدو كنتيجة لتقلص في حدّة التدرجات الحرارية الممكنة للمواد المعالجة بموجات الميكرو. تدّعي الانتقادات الموجهة لأثر موجات الميكرو غالبا أنّ الاختلافات تعزى إلى ضعف قياس درجة الحرارة و ضعف التّحكم في الشروط التجريبية الناتجة عن الخطأ النّظامي (الأجهزة). إنّ وجود أو عدم وجود أثر لموجات الميكرو يضلّ مجالا لمناقشة و بحث واسعين. لقد تمّ التطرّق لبعض ما أُلّف في أثر موجات الميكرو في الأقسام المتأخرة من الفصل الأول.

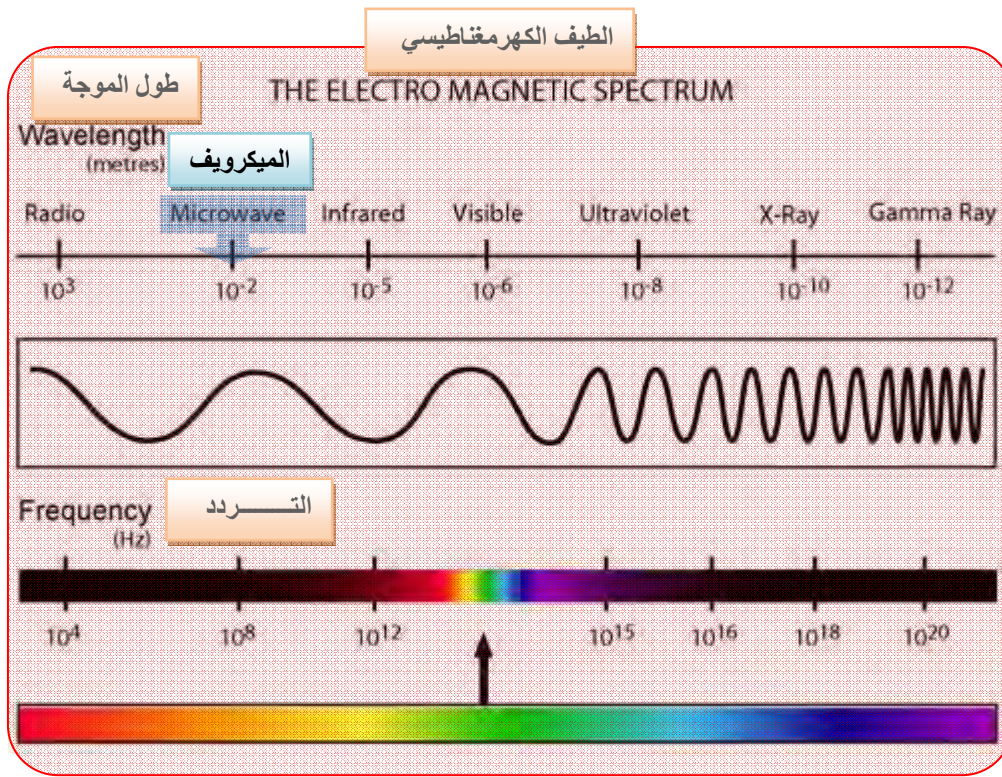
مع أنّ التسخين بموجات الميكرو يعطي مزايا أكثر ممّا يعطيه التسخين التقليدي، فإن اختلاف آلية تحويل الطاقة في التسخين بموجات الميكرو نتج عنه كذلك عدّة تحدّيات جديدة في المعالجة. بما أن الطاقة تحوّل بواسطة الحقل الكهرومغناطيسي، فإن عدم تجانس هذا الأخير سينجم عنه عدم تجانس في التسخين. و كون المواد تعالج فإنها غالبا ما تجتاز تحولات فيزيائية و بنيوية تؤثر في الخصائص العزلية. وهكذا تتغير مقدرة موجات الميكرو على توليد الحرارة أثناء عملية المعالجة. و يمكن أن تنتج عن تحولات حادة في مقدرة موجات الميكرو على توليد الحرارة صعوبات في عملية تصميم النّماذج و التّحكم. إن فهم ما يتعلّق بتوليد و إنتشار و تفاعل موجات الميكرو مع المواد أمر حرج. بسبب أن معدّات المعالجة تحدّد الحقل الكهرومغناطيسي فتصميم تجهيزات موجات الميكرو المستعملة مهم على الخصوص. إن خصائص الحقل الكهرومغناطيسي و التّركيب الكيميائي للمواد المعالجة و تغيرات البنية التي تحدث أثناء المعالجة و حجم و شكل الأجسام المسخّنة و تفاعلات موجة ميكرو/ مواد كلّ هذه العوامل تعقد من عملية المعالجة بموجات الميكرو.

إنّ اهتماما حديثا باستعمال موجات الميكرو في معالجة المواد ركّز الضوء عليه بعدد من الملتقيات خصّصت لهذا الغرض [5-13] ساهمت فيها كل من جمعية البحث في المواد (MRS) و جمعية الخزف الأمريكية. إضافة إلى توسيع عدد المؤلفات المنشورة حول المعالجة بموجات الميكرو، تطرّقت هذه الملتقيات

إلى الصعوبات العديدة المرتبطة بالمعالجة بموجات الميكرو. إن الأبحاث الأخيرة في تصميم تجهيزات موجات الميكرو و التفاعلات موجة ميكرو/مواد و معالجة المواد تستمر في توسيع و تأكيد أهمية تقانة موجات الميكرو.

2-I تعريف موجات الميكرو

تنتمي موجات الميكرو (الميكرويف) إلى طيف الموجات الكهرومغناطيسية (شكل a1.I) ذات طول موجة ينحصر بين 1 ملليمتر إلى 1 متر بالترددات الموافقة 300 ميغا هيرتز و 300 جيجا هيرتز. يتضمن هذا المجال من الطيف الكهرومغناطيسي ترددات تستخدم في الهواتف، الرادار و الأقمار الاصطناعية للاتصالات التلفزيونية.



شكل a1.I : طيف الموجات الكهرومغناطيسية الذي تنتمي إليه الميكرويف (Microwave).

بالنسبة للتسخين بموجات المايكرو حجزت لجنة الاتصالات الفدرالية (FCC) ترددين لأغراض الصناعية والعلمية والطبية (ISM) وهما يستخدمان بشكل شائع في التسخين بموجات الميكرو. الترددان المذكوران هما: 0.915 و 2.45 جيجا هيرتز. تمّ حديثاً تطوير أفران تسمح بالمعالجة بترددات متغيرة من 0.9 إلى 18 جيجا هيرتز [14].

3-I النظرية الكهرومغناطيسية

تشتمل الأفران العاملة بموجات الميكرو على ثلاث مكونات أساسية وهي: المنبع، خطوط التوصيل و المطبق. يولد المنبع الإشعاعات الكهرومغناطيسية، و تمرر خطوط التوصيل الطاقة الكهرومغناطيسية من المنبع إلى المطبق. في المطبق إما أن تمتص الطاقة أو أن تنعكس على المادة. إن التحليل النظري لكل من هذه المكونات تتحكم فيه الشروط الحدية ومعادلات ماكسويل:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & \nabla \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}, & \nabla \mathbf{D} &= \rho, \end{aligned} \quad (1)$$

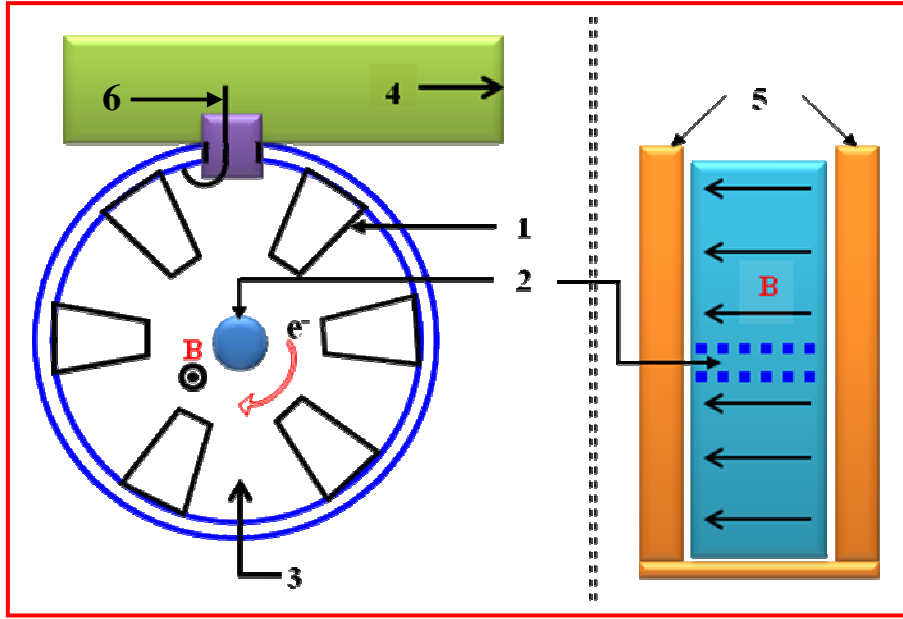
حيث (E) يمثل شعاع الحقل الكهربائي، (H)، شعاع الحقل المغناطيسي، (D)، شعاع كثافة التدفق الكهربائي، (B)، شعاع كثافة التدفق المغناطيسي، (J)، شعاع كثافة التيار، و ρ ، كثافة الشحنة. تمثل معادلات ماكسويل هذه القوانين الفيزيائية التي تصف الحقول الكهرومغناطيسية المتغيرة مع الزمن. إن طراز منابع موجات الميكرو و خطوط التوصيل و المطبقات و مقدره التنسيق بين هذه العناصر لبناء نظام فعال لمعالجة المواد يتطلب معرفة و فهم للنظرية الكهرو مغناطيسية.

1.3-I منابع موجات الميكرويف

إن توليد الإشعاع الكهرو مغناطيسي ينتج عن تسارع الشحنة. لبلوغ الاستطاعة العالية و الترددات المطلوبة للتسخين بموجات الميكرو، أغلبية المنابع عبارة عن أنابيب مفرغة من الهواء. بعض الأنابيب المفرغة التي أستعملت في التسخين المذكور تشتمل على مغنطرونات و أنابيب تجوال الموجة و كلايسترونات. إن أنابيب المغنطرونات المستعملة في أفران موجات الميكرو المنزلية فعالة و موثوقة [15]. بسبب أن المغنطرونات تنتج بكثرة، فهي المنبع المتوفر بأخفض كلفة. لإنتاج الحقل الكهرو مغناطيسي، تستعمل المغنطرونات بنى الرنين (التجاوب) و بالتالي فهي الوحيدة القادرة على توليد حقل كهرومغناطيسي ذو تردد محدد (مثبت). في موجات الميكرو ذات التردد المتغير، تستخدم أنابيب تجوال الموجة (أ.ت.م.) (TWT) في توليد الحقل الكهرومغناطيسي. إن تصميم (أ.ت.م.) يسمح بتضخيم عصابة عريضة من ترددات موجات الميكرو باستعمال نفس الأنبوب.

1.1.3-I المغنطرونات

في الأنابيب المفرغة، يكون المصعد عند كمون عال مقارنة بالمهبط، يولد فرق الكمون الحاصل حقلًا



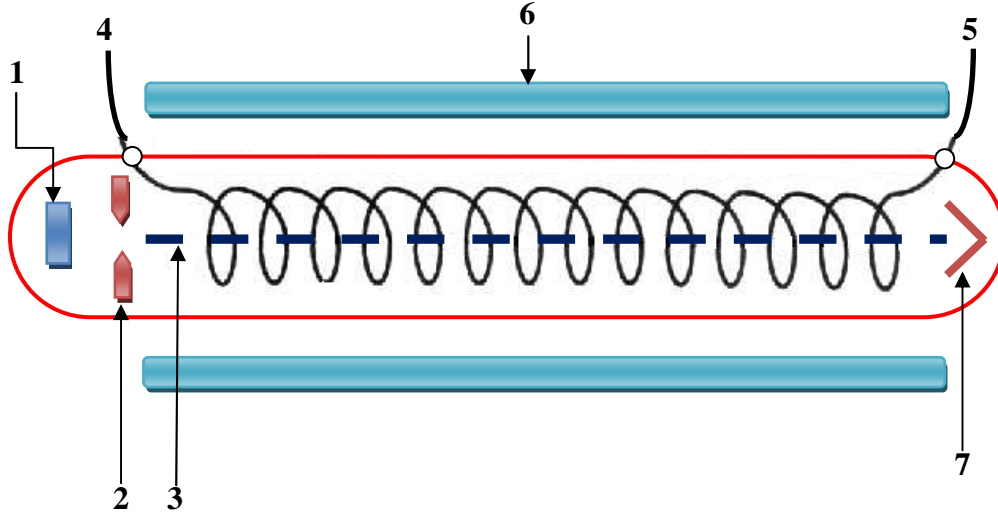
شكل 1. b1: مخطط توضيحي لأنبوب موجات الميكرو للمغنترون: منظر علوي (على اليسار)، منظر جانبي (على اليمين). (1) مصعد، (2) مهبط، (3) حجرة رنين، (4) موجه الموجة، (5) مغناطيس دائم، (6) مجس التزاوج [44].

كهربائياً قويا، و يسخن المهبط لقلع إلكترونات التكافؤ الطليقة ثم تسرع باتجاه المصعد بواسطة الحقل الكهربائي. يستعمل مغناطيس خارجي في المغنترون (شكل b1-I) عمودي على الحقل الكهربائي. ويخلق الحقل المغناطيسي المطبق قوة دورانية في الإلكترونات و هي تتسارع نحو المصعد. تجعل هذه القوة الإلكترونات تتجول في اتجاه لولبي و هذا يخلق سحابة دوامة من الإلكترونات. بما أن الإلكترونات تعبر حجرات الرنين ، فإن هذه الحجرات تجعل سحابة الإلكترونات تهتز، ويتعلق تردد الاهتزازات بحجم الحجرات. تتزاوج الطاقة الكهرومغناطيسية بدءا بوحدة من حجرات الرنين إلى خطوط التوصيل عبر خط مزدوج أو مطلق (مسير) موجه الموجة.

للتحكم في معدل طاقة خروج أنابيب المغنترونات، تستعمل طريقتان بشكل شائع إما عبر ضبط دورة العملية، أو بضغط تيار المهبط أو قوة الحقل المغناطيسي. في أفران موجات الميكرو المنزلية، يشغل المغنترون بأقصى استطاعته. أثناء وقت محدد، يغلق ويفتح التيار لأجزاء من الدورة، و بالتالي متوسط (معدل) الاستطاعة يخفّض [16]. هذا النوع من التحكم القائم على الفتح و الغلق (فتح/غلق) غالبا ما يتعلق بوظيفة التحكم بالدورة. إذا تطلب استعمال موجات ميكرو ذات استطاعة مستمرة، فإن استطاعة خروج أنبوب المغنترون يغير بتعديل شدة تيار المهبط أو بتغيير شدة الحقل المغناطيسي. يسمح هذا بتحكم متغير لإستطاعة موجات الميكرو في المجال الذي يتيح المنبع.

2.1.3-I أنابيب تجوال الموجة

تستعمل أنابيب تجوال الموجة عالية الإستطاعة في أجهزة موجات الميكرو ذات التردد المتغير على خلاف المغنترونات، أين يستعمل الأنبوب لخلق تردد الإهتزازات و تضخيم الإشارة معا ف (أ.ت.م.) يستعمل للتضخيم فقط. كما يولد هزاز ذو جهد متحكم فيه إشارة موجة الميكرو. يتحكم جهد الدخول في تردد



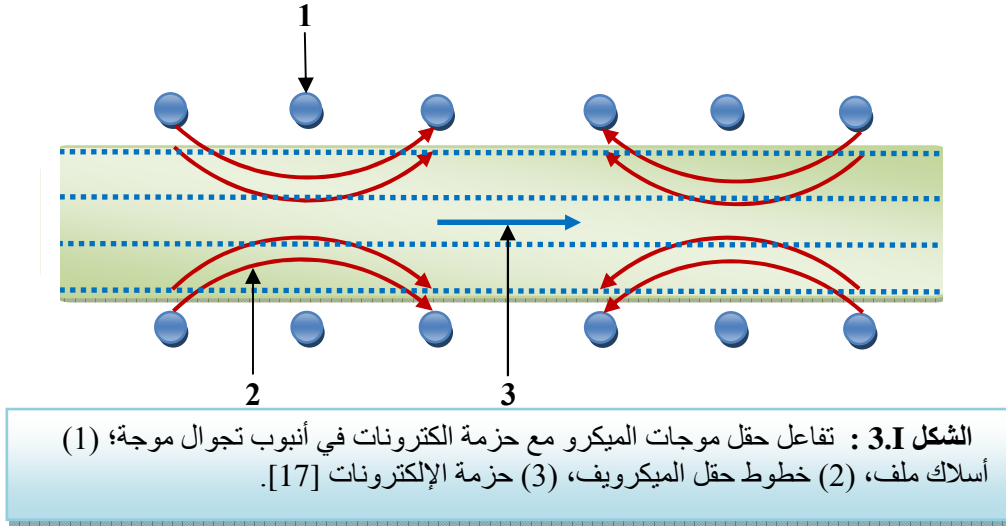
الشكل 2.I : مخطط توضيحي لأنبوب تجوال الموجة (1) مهبط، (2) مصعد، (3) حزمة إلكترونات، (4) مدخل من الذئذب، (5) مخرج نحو المطبق، (6) مغناطيس التنبير، (7) مجمع [31].

الإهتزازات و تبعث الإشارة إلى (أ.ت.م.) أين تضخم [14]. لأن الهزاز يحدد تردد موجة الميكرو فهذا النوع من المنايع قادر على تبديل تردد الخروج بسرعة.

يتكون أنبوب تجوال الموجة (شكل 2-I) من عنصرين أساسيين هما: مدفع إلكتروني و خط التوصيل الحلزوني (اللولبي). بسبب غياب بنى التجاوب في هذه الأنابيب يصير بإمكانها تضخيم ترددات واسعة التغير (نطاق التميرير؟) بالأنبوب نفسه. يرسل المهبط المسخن سيلا من الإلكترونات التي تسرع باتجاه المصعد و تبار بواسطة حقل مغناطيسي خارجي. يهدف السلك اللولبي إلى تبطيئ سرعة طور موجات الميكرو (السرعة باتجاه محور اللولب) و جعلها تساوي تقريبا سرعة حزمة الإلكترونات. تنتشر على طول السلك اللولبي ومقدار تباعد لقات السلك اللولبي يحدد سرعة طور الموجة [17].

عندما تنتشر إشارة موجات الميكرو على امتداد السلك اللولبي، فإن المركبة المحورية للحقل الكهرومغناطيسي تتفاعل مع الحزمة الإلكترونية (شكل 3-I). ينتج عن هذا تسارع و تباطؤ 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 و يتباطأ. وبالتالي تضح الإشارة لأن الطاقة تتحول من حزمة الإلكترونات إلى حقل موجة الميكرو [18].



تزاوج خطوط التوصيل طاقة منبع موجة الميكرو بالمطبق. تكون خطوط التوصيل، في الأنظمة العاملة بإستطاعة منخفضة، عبارة عن كابلات محورية (مشاركة بالمحور) تشبه تلك المستعملة في هوائيات التلفزيونات. عند ترددات و إستطاعات الخروج المرتفعة، يكون الضياع في الكابلات المحورية مهما و بالتالي غالبا ما تختار موجهاً الأمواج كخط توصيل في أنظمة التسخين بموجات الميكرو. إن موجهاً الأمواج عبارة عن أنابيب مجوّفة تسمح بانتشار الموجات الكهرومغناطيسية فيها. يشار إلى أن أغلبية المقاطع العرضية لموجهاً الأمواج و الشائعة الإستعمال مستطيلة الشكل.

هناك نمطان ممكنان لإنتشار موجات الميكرو في موجهاً الأمواج هما: النمط الكهربائي المستعرض (ك م) و النمط المغناطيسي المستعرض (م م)، بالنسبة للنمط ك م تكون الشدة الكهربائية في إتجاه الإنتشار منعدمة. أما بالنسبة للنمط م م تكون الشدة المغناطيسية في اتجاه الانتشار منعدمة. كل حل رياضي لموجة كهرومغناطيسية داخل موجة مستطيل يمكن أن يفكك (ينشر) إلى توفيقية خطية للنمطين ك م. و م م. إن النمط الأكثر استعمالاً في موجة الموجة هو النمط (ك م₀₁) القرينة تحدد نمط الانتشار، والنمط يحدد عدد النهايات القصوى و الدنيا لكل حقل في موجة الموجة.

يوجد العديد من مركبات خطوط التوصيل الأخرى، إضافة إلى موجهاً الأمواج، التي تستخدم في: أجهزة الحماية، لأغراض الاستشعار، و إقران (تزاوج) موجات الميكرو بالمادة في المطبق.

1.2.3-I ماص الإشعاع المنعكس

عندما تسخن المواد التي لا تمتص الطاقة الكهرومغناطيسية بشكل جيد، فإن مقداراً مهماً من الإستطاعة غالباً ما ينعكس عائداً إلى منبع موجات الميكرو. إن فرطاً في الإستطاعة المنعكسة يمكن أن يلحق أضراراً بالمغنترونات. يتمثل هدف الدوار (ماص الإشعاع المنعكس) في حماية معدات موجات الميكرو بتصرفه المشابه لثنائي في دارة كهربائية؛ يسمح لموجات الميكرو بالمرور عبر الدوار في إتجاه واحد فقط. في الدوار ثلاثي الفتحات، توصل فتحة بمنبع موجات الميكرو و أخرى توصل بالمطبق، وثالثة توصل بالحمل (dummy load). و بالتالي تغير الإستطاعة المنعكسة و العائدة إلى المغنترون إتجاهها عن هذا الأخير ويقوم الحمل، غالباً ما يكون الماء، بإمتصاص الإستطاعة المنعكسة.

2.2.3-I المزوجات الإتجاهية

في التسخين بموجات الميكرو، تتعلق مقدرة المواد على امتصاص الطاقة الكهرومغناطيسية بالخصائص العزلية. وبالتالي، معرفة مقدار الاستطاعة الواردة و المنعكسة مفيدة للباحث. إن قياس الاستطاعة يتم عبر المزوج الإتجاهي الذي يصنع بكيفية تسمح لمقدار قليل من الموجات الواردة و المنعكسة أن تفصل و تقاس بمقياس للطاقة.

3.2.3-I المؤلفات (أجهزة المؤلفات)

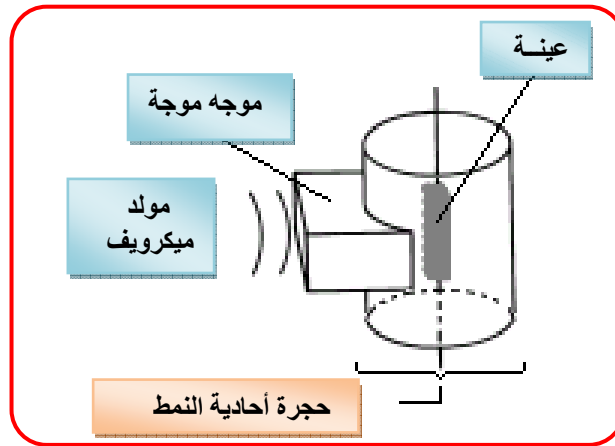
تستعمل المؤلفات لرفع الإستطاعة الممتصة من قبل الحمل إلى قيمتها القصوى بإحداث تجانس للممانعة. تستعمل العديد من المؤلفات التي تسمح بضبط الفروقات بين ممانعة منبع موجات الميكرو و الحمل.

3.3-I مطبقات موجات الميكرو وأنظمة المعالجة

إن تصميم المطبق يكون حرجاً للتسخين بموجات الميكرو لأنه يتم من خلاله تحويل طاقة الموجات إلى المادة. إن حقول درجات الحرارة داخل المادة، المجتازة بالتسخين بموجات الميكرو، متعلقة بتوزيع الحقول الكهربائية داخل المطبق. تشتمل مطبقات موجة الميكرو على: موجات الأمواج، أنابيب تجوال الموجة، حجرات أحادية النمط، و حجرات متعددة النمط. من أجل معالجة المواد، مطبقات التجاوب، كمطبقات أحادية النمط و متعددة النمط، هي الأكثر رواجاً لأن قوى حقولها الكهرومغناطيسية عالية. إن نوع المطبق المستعمل في نظام المعالجة بموجات الميكرو يتعلق غالباً بطبيعة المواد المراد معالجتها. إن النمط الأحادي و متعدد النمط، وأنظمة المعالجة متعددة النمط و متغيرة التردد المتوفرة تجارياً كلها تستعمل في أبحاث المعالجة بموجات الميكرو، وكل واحد من هذه الأنظمة له محاسن و مساوئ.

1.3.3-I المطبق أحادي النمط

في مطبق موجات الميكرو، أو الحجر، يمكن أن ينجز تحليل نظري بغرض وصف استجابة موجات الميكرو. بمعرفة هندسة المطبق يصير، غالبا، بالإمكان حل معادلات ماكسويل تحليليا أو عدديا بالشروط الحدية المناسبة. يعتمد تصميم مطبقات أحادية النمط على حل معادلات ماكسويل لتوافق نمط تجاوب واحد و بالتالي يكون حجم المطبقات من رتبة طول موجي واحد تقريبا. للحفاظ على نمط التجاوب، تتطلب هذه الحجرات منبع موجة ميكرو ذو تردد خروج قليل التغير، ولأنه يمكن تحديد مقدار الحقل المغناطيسي باستعمال الطريقة التحليلية أو العددية، فإن مناطق الحقل الكهرومغناطيسي عالية و منخفضة الشدة تصبح معروفة. يشار إلى أن مطبقات أحادية النمط لديها توزيع غير متجانس للحقل الكهرومغناطيسي لكن التنبؤ به ممكن. على العموم، تملك حجرات أحادية النمط بقعة ساخنة واحدة أين تكون فيها قوة حقل موجة الميكرو عالية. يظهر الشكل 3a.I مثلا على حجرة أحادية النمط صممت على شكل أنبوب اسطواني حيث يكون الحقل الكهرومغناطيسي للميكرويف أعظما في محورها ومنعدما على جدرانها.



شكل 3a.I : حجرة أحادية النمط أسطوانية الشكل.

هذه المقدره على تصميم مطبق تعرف فيه مواقع قوى الحقل العالية و المنخفضة يمكن أن تعطي ميزات إيجابية محددة. يمكن، عبر تصميم مناسب، لمطبقات أحادية النمط أن تستعمل لتبئير (تركيز) حقل موجة الميكرو عند موقع معطى. فقد استعملت هذه التقنية لتلحيم الخزفيات [19، 20] و حتى ثقبها كذلك!. يراد في هذا التطبيق تركيز طاقة موجة الميكرو على الحد الفصل البيني دون تسخين باقي حجم الخزفية. عندما يوضع الحد الفاصل في موضع الحقل الكهربائي العالي، يمكن بلوغ تسخين موضعي للحد الفاصل الخزفي. من الواضح أن الحدود التي يفرضها الحجم في مطبق أحادي النمط يحد من إستعمال هذه التقنية إلى حدود فاصلة بينية صغيرة نسبيا التي ستنطبق على منطقة قوة الحقل العالية في مطبق أحادي النمط. طور

تينقا و رفقائه [21] مطبقا أحادي النمط (open-ended) لهدف اللحام المستمر للوحات خزفية حيث تغلب على بعض من هذه الحدود العملية.

زيادة على هذا فإن معرفة توزيع الحقل الكهرومغناطيسي سيسمح بوضع المواد في المنطقة ذات شدة الحقل الأعلى و ذلك لتحقيق تزاوج أفضل. لهذا السبب، أستعملت هذه الحجرات لدراسة قياس التدرجات المخبرية للتفاعلات بين موجات الميكرو و المواد. على سبيل المثال، تستعمل غالبا حجرات أحادية النمط لدراسة أثر موجات الميكرو في المعالجة الحركية للصلد بإستعمال الراتينج [3، 22، 23]. من أجل دراسات العلاج الحركي، تعطي الحجرات أحادية النمط وسطا جد متحكما فيه حيث توضع العينات الصغيرة من أجل تزاوج أفضل. في حجرات موجات الميكرو الأكثر حجما، العينات الصغيرة المستعملة لغرض الدراسات الحركية لا تقدم تزاوج حمل مهما. وتكون العملية أكثر صعوبة للتحكم في تزاوج الأحمال الصغيرة. توجد ميزة إضافية لحجرات أحادية النمط وهي مقدرتها على مراقبة الصور تلفزيونيا للخواص العزلية أثناء المعالجة [24].

و إن تكن نماذج التسخين ذات الحجرات أحادية النمط غير منتظمة، فإنه يمكن في بعض المطبقات أحادية النمط تبديل أنماط التجاوب. أحيانا، يكون لأنماط التجاوب المختلفة - الممكنة التحقيق داخل المطبق - نماذج تسخين إضافية (مكاملة). يتحقق تبدل النمط في مطبقات أحادية النمط بتغيير هندسة المطبق أو بضبط تردد منبع موجات الميكرو. لدى المطبق أحادي النمط الأسطواني، المطور في جامعة متشغان و المسوق من طرف وايغفات آي أن سي، إرتفاع قابل للضبط. فبضبط الإرتفاع يمكن للمطبق أن " يؤالف " إلى نمط تجاوب مختلف (مغاير). إنطلاقا من معرفة نماذج التسخين ذات الحجرات أحادية النمط يمكن للنمط التجاوبي أن يغير أثناء الإستعمال لبلوغ درجات حرارة منتظمة داخل المادة [25].

إن تغيير أبعاد الحجرة يتطلب مدة زمنية معينة و هذا يدعو إلى دراسة منابع موجة الميكرو المتكونة من أنبوب تجوال الموجة متغيرة التردد بغية تبدل النمط [26].

يغير التردد في أنابيب تجوال الموجة ليسمح للحجرة أن تتلقى نمط تجاوبي مغاير (مختلف). وبإستعمال هذه المنابع يتم التغلب على الفترة الزمنية المرتبطة بالتغيير الميكانيكي لأبعاد الحجرة. وإن تكن هذه الأنواع من المطبقات مستعدة لقبول أنماط تجاوب متعددة، فإن نمطا واحدا يمكن أن يختار في الوقت نفسه.

تشتمل تطبيقات أخرى للمطبقات أحادية النمط إستعمالات التسخين الإبتدائي لعملية الـ pultrusion [27] والمطبقات المصممة لمعالجة الشعيرات الخزفية (filaments) [28، 29]. مع أن مطبقات أحادية النمط لديها بعض التطبيقات الكامنة و دراسات على المستوى المخبري لتفاعلات موجة ميكرو/مواد، فإن حجرات أحادية النمط يصعب زيادة حجمها لبلوغ متطلبات العديد من التطبيقات الصناعية. و يرجع هذا إلى القيود الهندسية و عدم إنتظام الحقول. لهذا السبب تصمم، عموما، حجرات أحادية النمط لأغراض خاصة. و لمعالجة مكونات كبيرة الحجم ومعقدة الشكل يتطلب مطبقات أكثر حجما و ذات حقول أكثر إنتظاما.

2.3.3-I المطبقات متعددة الأنماط

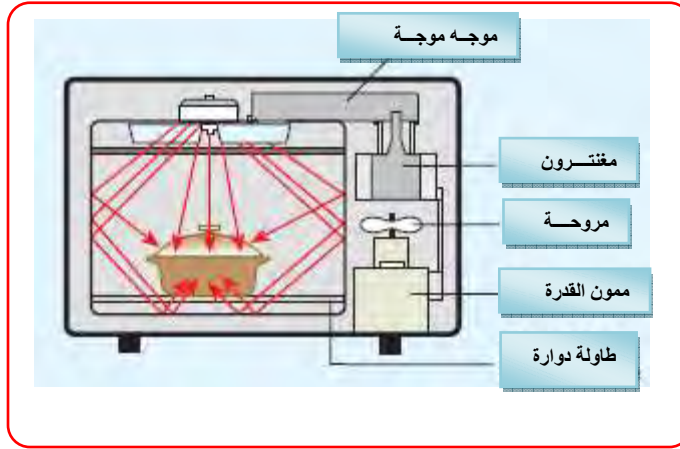
إن المطبقات القادرة على حمل (تقوية) عدد من الأنماط ذو رتبة أعلى في الوقت نفسه معروفة بإسم حجرات متعددة الأنماط. يستعمل هذا النوع من المطبقات في أفران الطبخ المنزلية العاملة بموجات الميكرو (شكل 3b و 3c). على خلاف تصميم مطبقات أحادية النمط، التي صممت اعتماداً على حلول معادلات الحقل الكهرومغناطيسي لمطبق معلوم الهندسة، فإن تصميم مطبقات متعددة النمط معتمدة (مؤسسة) غالباً على الصواب و الخطأ و التجربة و الحدس [30]. بزيادة حجم حجرة موجة الميكرو يزداد كذلك عدد أنماط التجاوب الممكنة. وبالتالي تكون مطبقات متعددة الأنماط أكبر طولاً من طول موجي واحد. من أجل حجرة مستطيلة الشكل، تعطى معادلة عند ترددات التجاوب [31]:

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

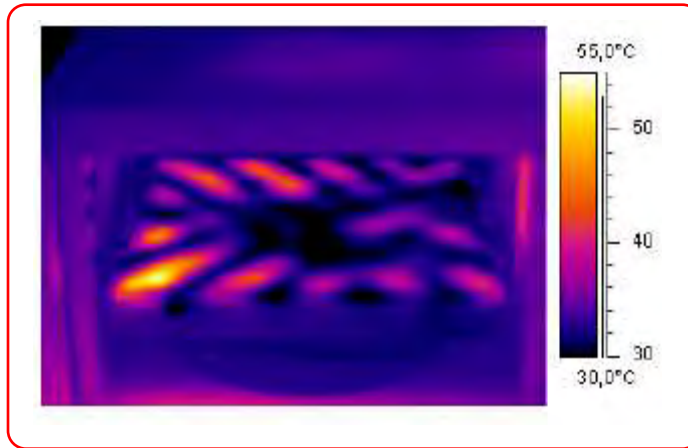
حيث f_{nml} هو تردد التجاوب للنمط TE_{nml} أو TM_{nml} ؛ c سرعة الضوء؛ l, m, n عدد تغيرات أنصاف الجيوب لنموذج الموجة العاملة على إمتداد المحاور X, Y, Z ؛ a, b, d أبعاد الحجرة في الإتجاهات X, Y, Z على الترتيب. ينتج عن وجود أنماط مختلفة العديد من البقع الساخنة داخل حجرة موجة الميكرو. كما في حجرات أحادية النمط، ينتج عن تقلبات محلية للحقل الكهرومغناطيسي فوق تسخين موضعي. لتخفيض أثر البقع الساخنة، أستعملت العديد من التقنيات لتحسين إنتظامية الحقل. يمكن تحسين إنتظامية حقل موجة الميكرو بزيادة حجم الحجرة. وبسبب التزايد السريع في عدد الأنماط داخل مطبق متعدد الأنماط نتيجة للزيادة في أبعاد الحجرة (المعادلة 2) نماذج (عينات) التسخين المتعلقة بأنماط التجاوب المختلفة تبدأ في التراكم. تطبيق قاعدة الإبهام لبلوغ الإنتظام في الحقل داخل المطبق تنص على أن أطول بعد يجب أن يكون أكبر بـ 100 مرة من الطول الموجي للتردد العامل [32]. لسوء الحظ، عند التردد الشائع 2.45 جيجا هيرتز، أطول بعد يجب أن يتجاوز 40 قدماً (1200 سم). بالأمكان بلوغ إنتظام أكبر في الحقل بالإشتغال عند ترددات أعلى. فعند الترددات الأعلى يكون طول الموجة أقصر، و بالتالي المطبق المطلوب، لبلوغ الإنتظام، يمكن أن يتقلص حجمه إلى حجم عملي.

إن يكن يبدو أن التردد الأعلى للمعالجة هو الحل لخلق إنتظام أكبر، فإن التردد 2.45 جيجا هيرتز قادر على التوغل أعمق لخلق تسخين حجمي داخل المادة. ولهذا السبب أجريت العديد من المحاولات لبلوغ تسخين أكثر إنتظاماً داخل أفران متعددة الأنماط و ذات حجم أصغر عند التردد 2.45 جيجا هيرتز [33]. يوجد مثال مألوف على ما ذكر في فرن موجة الميكرو المنزلي (شكل 3b و 3c). تجهز غالباً هذه الأفران بأرضية

دوارة تدور أثناء الإستغلال. إن هدف الأرضية الدوارة تقليص أثر البقع الساخنة و ذلك بتمرير الطعام خلال المناطق



شكل 3b.I : حجرة متعددة الأنماط لفرن ميكرويف بأبعاد جد عملية [83].



شكل 3c.I : تصوير لبنية أنماط أفقية داخل حجرة فرن ميكرويف ذات حجم $29 \times 29 \times 19 \text{ cm}^3$ باستعمال آلة تصوير (حرارية) ما تحت الأحمر [83].

عالية و منخفضة الإستطاعة، وبالتالي بلوغ إنتظام متوسط مع مرور الزمن. طريقة أخرى لتحسين إنتظام الحقل من خلال مخلطات النمط. مخلطات الأنماط عبارة عن عواكس تشبه المراوح، تدور داخل الحجرة بالقرب من خرج موجه الموجة. خلط الأنماط يخلط الأنماط بعكس الموجات عن شفرات المروحة ذات الأشكال غير المنتظمة و يعيد توزيع الحقل الكهرومغناطيسي بإستمرار. إن مخلطات الأنماط، مثلها مثل الأرضية الدوارة، تخلق إنتظاما وسطيا مع الزمن. زيادة على هذا، فإن إضافة مخارج متعددة لموجات الميكرو في حجرة متعددة الأنماط يرفع أكثر الإنتظامية [34].

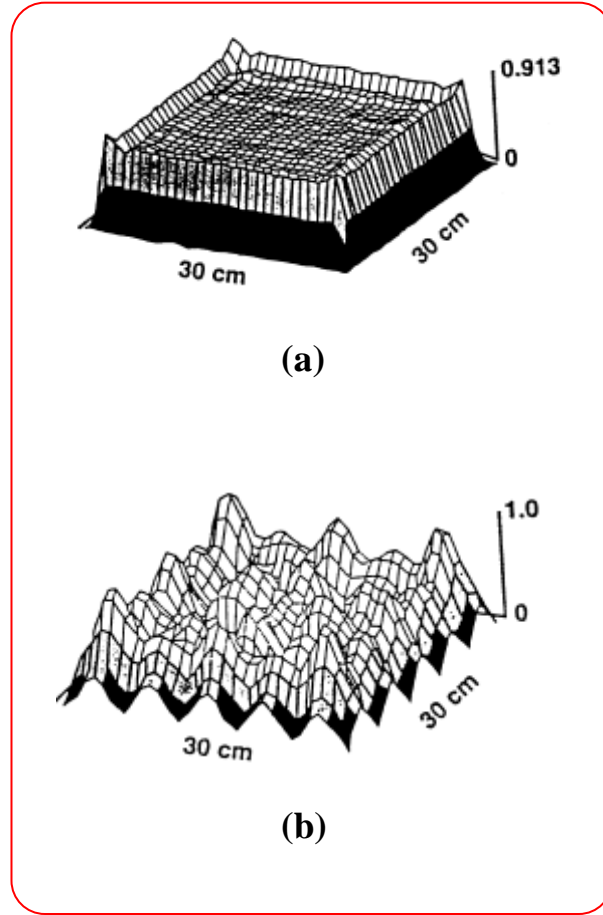
ترتبط أغلبية التقنيات المستعملة في خلق الإنتظامية بتغيير الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة موجة الميكرو. طورت طريقة أخرى لبلوغ تسخين أكثر إنتظامية متمثلة في التسخين الهجين (المختلط). يتم التسخين الهجين بتركيب التسخين بموجات الميكرو والتسخين عن طريق التحويل التقليدي للحرارة عبر الإشعاع، الحمل، أو النقل. أستعملت تغيرات هذه الطريقة بنجاح من قبل باحثين يعملون بالمختبر الوطني لأوك ريدج [35] وجامعة فلوريدا [36] للتسخين المنتظم للخزفيات داخل فرن متعدد الأنماط .

تعتبر مطبقات متعددة الأنماط نموذجية و أكثر لدونة في الإستعمال، من مطبقات أحادية النمط، لمعالجة الأجسام الكبيرة و المعقدة الشكل. هكذا كانت أنظمة متعددة الأنماط، إلى حد بعيد، أنظمة المعالجة الأكثر شيوعاً (عموماً) في التطبيقات الصناعية. قامت كلا من جامعتي ديلاور و فلوردا بتركيز أبحاثهما المتعلقة بالمعالجة بموجات الميكرو على إستعمال أنظمة متعددة الأنماط لمعالجة مركبات البولمر و الخزفيات. نظام المعالجة الذي إستخدمته جامعة ديلاور (Model 101 Microwave Materials Technologies Inc) هو عبارة عن نظام موجة ميكرو متعدد الأنماط 5001 ، ذو إستطاعة 6 كيلواط. جهزت الحجرة الكبيرة بعدة مخارج لموجهات الأمواج و خلط للأنماط بغية زيادة إنتظامية حقل موجات الميكرو. إضافة إلى هذا، يمكن للحجرة أن تخلى (تفرغ) و يعاد شغلها بغاز للتغليف لمعالجة الخزفيات في محيط قابل للتحكم. من أجل أبحاث مركبات البولمر تم تعديل نظام الخلاء ليسمح بتطبيق ضغط على رقائق المركب بإستعمال كيس خلاء.

كما طورت حديثاً أنظمة معالجة متعددة الأنماط متغيرة التردد لأبحاث المواد. تم تطوير فرن موجة الميكرو متغير التردد (ف م م ت) (VFMF) من طرف باحثي المختبر الوطني لأوك ريدج و لامدا تكنولوجي، أي، ان، سي، الذي كان قادراً على تجاوز العقبات الناجمة عن عدم إنتظامية الإستطاعة داخل حجرات متعددة الأنماط. يستعمل النظام منبع أ ت م لمسح تردد حقل موجة الميكرو. الحجرة المستعملة في هذا النوع من النظام هي حجرة متعددة الأنماط. والنتيجة هي إنتظامية وسطية للإستطاعة مع الزمن داخل حجرة موجات الميكرو. إن المقدره على تحريض (حث) العديد من أنماط التجاوب المختلفة بمرح التردد يسمح بتسخين منتظم داخل حجرة صغيرة. ثبت أنه يمكن لرقائق مركب كبير أن تعالج مرتين متواليتين [37]. ، وكذلك أحجام كبيرة من الراتينج (resin) يمكن أن تعالج بإنتظام بموجة ميكرو متغيرة التردد [38]. كما هو حاصل في أنظمة المعالجة متعددة الأنماط و المحددة التردد، فإن الإنتظامية ستزداد أكثر في مطبق واسع (كبير) نتيجة لإمكانية ظهور عدد أكبر من أنماط التجاوب الممكنة.

طورت نماذج نوعية لتوزيع الإستطاعة في الـ (ف م م ت) لتوضيح المقدره على خلق إنتظامية داخل حجرة صغيرة بمرح الترددات خلال نطاق تمرير (bandwidth) [14،39]. يستعمل النموذج المعادلة (2) لحساب ترددات نمط التجاوب في نطاق التمرير. لقد حسبت إستطاعة كل تردد تجاوب ثم جمعت ببعضها للحصول على كثافة إستطاعة موحدة (شكل I-4). كما هو متوقع من زيادة أنماط التجاوب الممكنة، فإن إنتظامية طاقة موجة الميكرو قد حسنت عندما يمسح التردد. و إن يكن تردد موجات الميكرو هو الإقتراب

الأنيق جداً، يعني لخلق الإنتظامية داخل حجر صغيرة، فإن منابع أ.ت.م. باهضة التكلفة بالنسبة لمقدار الإستطاعة المولدة. ولهذا يسود الإعتقاد عند أغلبية الباحثين أن المعالجة بالتردد المثبت (المحدد) لديها تطبيقات أكبر في الصناعة نتيجة لمتانة التقانة في هذا المجال إضافة إلى التكلفة المنخفضة للمعدات.



الشكل 4.I : توزيع الاستطاعة في : (أ) جهاز موجات ميكرو متغير التردد ذو عرض عصابة 2 جيغا هيرتز و (ب) جهاز موجات ميكرو مشتغل عند التردد 2.45 جيغا هيرتز [14].

4-I تفاعلات موجة ميكرو/مواد

تحول الطاقة إلى المواد بتفاعل الحقل الكهرومغناطيسي على المستوى الجزيئي، وتحدد الخواص العزلية أثر الحقل الكهرومغناطيسي في المادة بشكل حاسم. وهكذا يمكن إعتبار فيزياء تفاعل موجة ميكرو/مواد ذات أهمية بالغة في المعالجة بموجات الميكرو. إن تفاعل موجات الميكرو بثنائيات الأقطاب الجزيئية ينتج عنه دوران هذه الأخيرة، وتبدد الطاقة كحرارة بدءاً بمقاومة داخلية إلى دوران. سيقدم في هذا العنصر المبادئ المسؤولة عن تفاعلات موجة ميكرو/مواد و إمتصاص الإستطاعة وقياس الخواص العزلية. قدمت نماذج

مبسطة و تناظر لتفاعلات موجة ميكرو/مواد متى كان ذلك ممكنا للإعانة في فهم الفيزياء التي تقف وراء إستجابة المادة.

1.4-I الخواص العزلية للمادة

من أجل أن تولد الحرارة داخل المادة، يجب على موجات الميكرو أن تكون قادرة على دخول المادة و إيصال الطاقة إليها. إن ثابت العزل ϵ ومعامل فقدان العازلية ϵ'' يحددان كمية المركبتين السعوية و النقلية للإستجابة العزلية. غالبا ما يعبر عن هذين المركبتين بعبارة ثابت العزل المركب ϵ^*

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (3)$$

كما توجد عبارة أخرى شائعة الإستعمال للتعبير عن الإستجابة العزلية هي ظل الفقدان.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4)$$

يوجد عدد من الخواص التي تساهم في الإستجابة العزلية للمواد. تشمل هذه الخواص على آليات الإستقطاب الإلكتروني و الإستقطاب الذري و الناقلية الأيونية و إستقطاب ثنائيات الأقطاب (توجه ثنائيات الأقطاب)، وآلية إستقطاب ماكسويل وانبير. عند ترددات موجات الميكرو، يعتقد أن إستقطاب ثنائيات الأقطاب هي الآلية الأكثر أهمية في تحويل الطاقة على المستوى الجزيئي [41,40]. زيادة على هذا، في المواد المركبة، فإن إستقطاب ماكسويل وانبير، الذي ينتج عن تجمع الشحنة عند السطح البيني للمادة، تعتبر كذلك آلية تسخين مهمة [40].

في المواد العازلة، تتحرك الشحنة المحلية كإستجابة للحقل الكهربائي المطبق. يوجد داخل المادة شحن مقيدة و أخرى حرة، و ينتج عن حركة الشحنة إستقطابا. إن إستقطاب الشحنة الكهربائية عندما تقيد الحركة الإنسحابية أو عندما تقيد الحركة الدورانية للجزيئات المستقطبة، ينتج عنه تأخر بين الحقل الكهربائي و الإستقطاب. هذا التأخر الزمني، معروف بإسم زمن الإسترخاء، وهو ناتج عن تبديد الطاقة على شكل حرارة داخل المادة. التسخين بموجات الميكرو هو كنتيجة لهذا الإسترخاء العزلي.

2.4-I الإسترخاء العزلي

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

$$\tau \frac{\partial k}{\partial t} + k = h \quad (5)$$

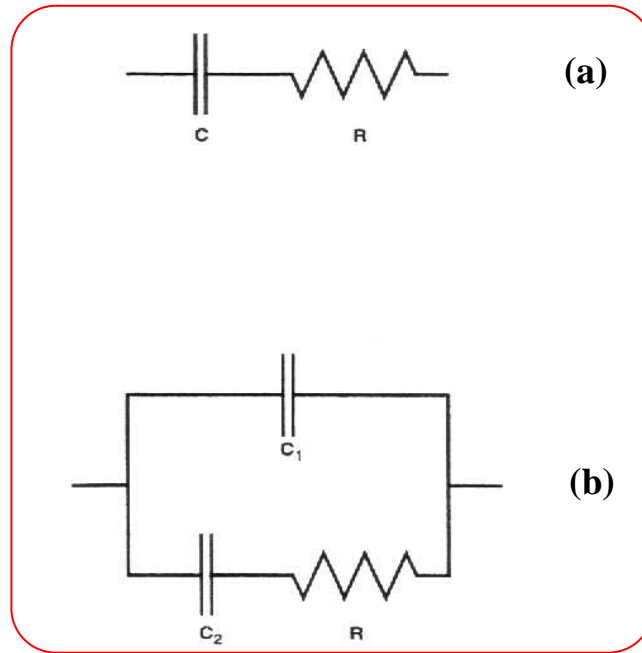
حيث k و h متغيران.

إن ظاهرة الإسترخاء في المواد العازلة ماثلة للإسترخاء في الدارات الكهربائية. إن النماذج التي تصف الإسترخاء في المواد العازلة غالبا ما تركز على الدارات الكهربائية المكونة من مقاومات و مكثفات (سعات) على التسلسل أو التوازي.

إن أبسط دارة تظهر زمن الإسترخاء هي مقاومة و مكثفة على التسلسل (شكل 5-I (a)). بجمع التوتر (V) عبر كلا من المقاومة و المكثفة، يمكن الحصول على المعادلة التفاضلية للشحنة، Q، في الدارة:

$$R \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{C} = V, \quad (6)$$

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



الشكل 5.I : دارتان كهربائيتان مستعملتان لنمذجة المواد العازلة [42].

يمكن إعادة كتابة المعادلة (6) على شكل المعادلة (5)

$$\tau \frac{\partial Q}{\partial t} + Q = CV, \quad (7)$$

حيث τ زمن الإسترخاء.

$$\tau = RC \quad (8)$$

إن حل هذه المعادلة التفاضلية، أين يكون التوتر جيبيًا ومفترض مركبًا $V_0 = e^{i\omega t}$ ، في الإحداثيات القطبية هو [42]:

$$Q^*(\omega, t) = \frac{V_0}{Z(\omega)} e^{i(\omega t - \delta)}, \quad (9)$$

حيث δ هي الزاوية بين شعاع الشحنة، Q^* ، وشعاع التوتر، V^* ، في تمثيل فازو في المستوي المركب (شكل 6 (a)). يتناسب التأخر بين الشحنة والتوتر مباشرة بـ δ عندما تكون الإستطاعة المبددة صغيرة. كذلك في المعادلة (9) تمثل ω التردد الزاوي و Z الممانعة.

أستعملت دارة مهمة كنموذج للمواد العازلة مكونة من مقاومة و سعة على التسلسل بالتوازي مع مكثفة (شكل 5-I (b)). يمكن أن تحدد ممانعة هذه الدارة من تحليل الدارات الأولية:

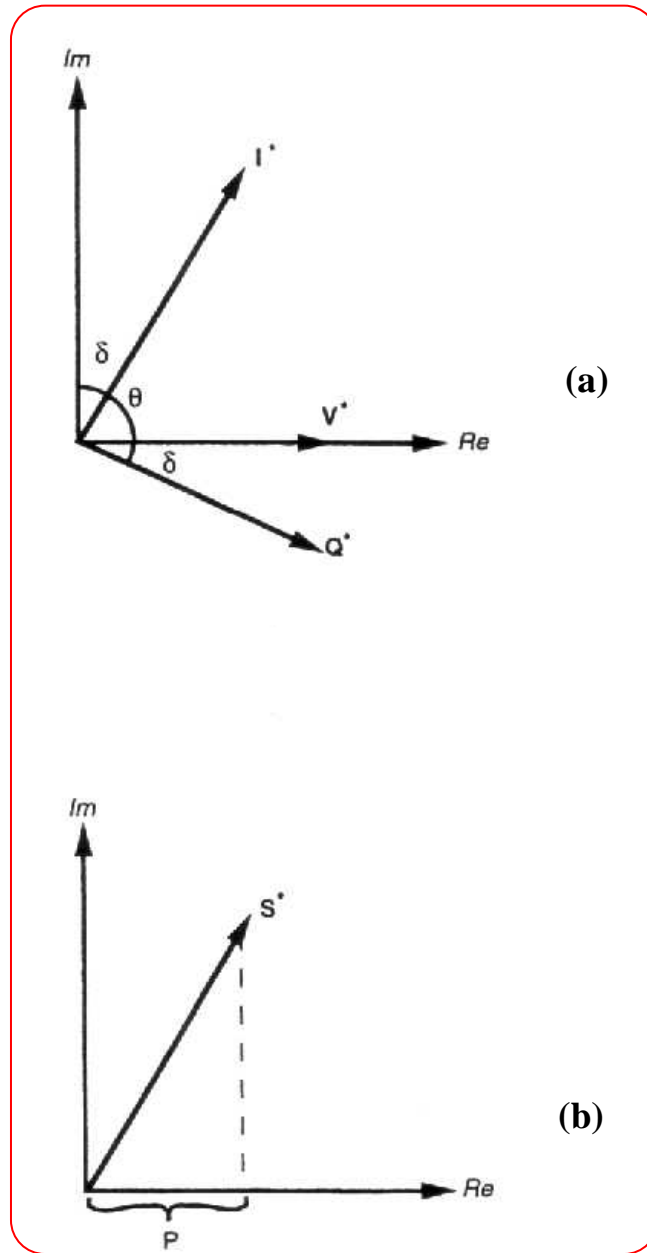
$$Z = \left(\frac{i\omega C_1}{R + i\omega C_1} + i\omega C_2 \right)^{-1}, \quad (10)$$

حيث C_1 و C_2 هما السعتان المعرفتان في الشكل 5 (b). العلاقة بين الشحنة و التوتر معرفة كما يلي [42]:

$$Q^*(\omega, t) = C^*(\omega) V^*(\omega, t), \quad (11)$$

حيث C^* هي السعة المركبة. بالتالي العلاقة بين الممانعة والسعة يمكن أن تعرف من التيار المتغير الجيبي بالعبارة :

$$Z(\omega) = \frac{1}{1 + i\omega C^*(\omega)}, \quad (12)$$

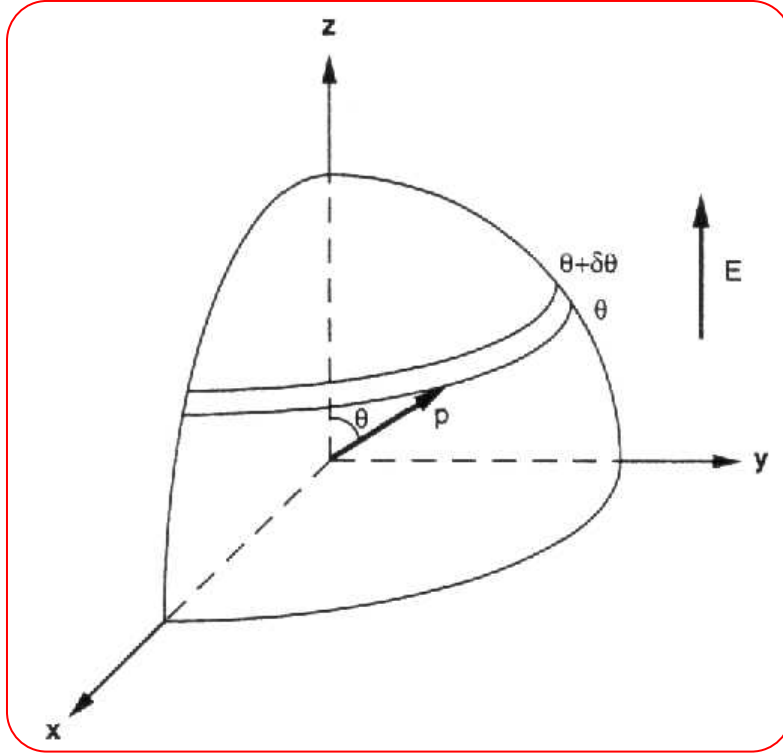


الشكل 6.1 : مخطط فازور لـ: (a) التيار، التوتر و الشحنة؛ (b) الاستطاعة في دارة كهربائية [42].

من المعادلتين (10) و (12) يمكن أن تعرف السعة المركبة:

$$C^* = C_1 + \frac{C_2}{1 + \omega^2 C_2^2 R^2} - \frac{i\omega RC_2^2}{1 + \omega^2 C_2^2 R^2}. \quad (13)$$

شكل السعة المركبة هذه مماثل لشكل حل ديبياي الكلاسيكي لسائل عازل مثالي. يوجد عدة طرق لإشتقاق معادلات ديبياي مؤسسة على التفاعل المجهري لثنائيات الأقطاب مع الحقول الكهرومغناطيسية المطبقة [43،42].



الشكل 7.1: نموذج لثنائي قطب مستعمل في تمثيل ديبياي لسائل مثالي [43].

إن وصف ديبياي الكلاسيكي لسائل عازل مثالي مفيد للإستعمال 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 الإتجاهات داخل المادة. عندما يطبق الحقل الكهرومغناطيسي، تسعى ثنائيات الأقطاب إلى التوجه بجهة الحقل الكهربائي (شكل I-7). توازن القوة في ثنائي القطب يعطي المعادلة الموالية:

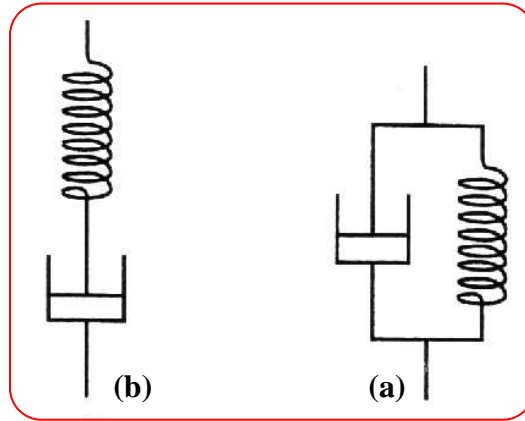
$$I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C \frac{\partial \theta}{\partial t} - pE \sin \theta = 0, \quad (14)$$

حيث يمثل E شدة الحقل الكهربائي، θ ، الزاوية بين ثنائي القطب و حقل موجة الميكرو، I، عزم العطالة لثنائي القطب، C، اللزوجة داخل المادة، p، عزم ثنائي القطب. من معادلة الحركة السابقة، تحاليل إحصائية لتوجهات ثنائيات الأقطاب يمكن أخذها بعين الاعتبار، و يمكن الحصول على ثابت العزل المركب من المعادلة الموالية [43]،

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} - \frac{i(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (15)$$

حيث ε_0 ثابت عزل الفراغ، عند إنعدام التردد و ε_{inf} ثابت العزل عندما يكون التردد لانهائيا. هذا مماثل لشكل المعادلة (13) حيث أستبدلت السعات بثوابت العزل.

إن حل ديبياي من أجل سائل مثالي تم تبسيطه قليلا و هو في غالب الأحيان غير صالح للتطبيق على العديد من المواد. ينتج نموذج ديبياي عن زمن إسترخاء واحد فقط، و المواد غالبا ما تظهر أكثر من زمن إسترخاء واحد. كنتيجة لهذا، طورت نماذج أكثر تعقيدا لوصف السلوك العزلي لأنواع مختلفة من المواد [41]. يشابه نموذج ديبياي للخواص العزلية كلا من نموذجي فويت و مكسويل المكون من نوابض و مكابس المستعملة في المرونة-اللزوجة للبولمر (شكل-8) (Viscoelasticity). وإن تكن هذه النماذج في الغالب غير قابلة للتطبيق على العديد من المواد، فإنها تعتبر الأساس الذي شكلت عليه النماذج الأكثر تعقيدا. إن ظاهرة الإسترخاء في المواد العازلة تشابه ظاهرة اللدونة-اللزوجة لأن المعادلات المتحركة في الظاهرتين هما من الشكل نفسه [44]. وإن يكن نموذج ديبياي مبسطا، فإنه يبين أن زمن الإسترخاء يتأثر ببنية المادة. ترتبط مقدرة المواد على أن تسخن بموجات الميكرو بمقدرة توجه ثنائيات الأقطاب باتجاه الحقل الكهرومغناطيسي، و هذه المقدرة على التوجه تحدد الخواص العزلية.



الشكل 8.I: نمودجي (a) فويغت و (b) مكسويل للزوجة - مرونة [44].

3.4-I تحول الطاقة

إن تركيب الخواص العزلية للمواد مع الحقول الكهرومغناطيسية المطبقة ينتج عنه تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية إلى حرارة. يمكن تحديد الإستطاعة المرسله إلى الجسم بإستعمال نظرية الشعاع المؤشر (pointing Vector Theorem) [31]، حيث يتم إشتقاقها من معادلات ماكسويل. إن الإستطاعة المرسله عبر السطح، S، للحجم، V، معطاة بالجزء الحقيقي للمعادلة الموالية:

$$\frac{1}{2} \oint_s \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{S}, \quad (16)$$

حيث $\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*$ يمثل الشعاع المؤشر و العلامة * ، في هذه الحالة، تدل على المرافق التخيلي. بإستعمال نظرية التبادل، معادلات ماكسويل، و بإفتراض إن خواص المواد نفسها في كل الحجم فإن المعادلة الموالية يمكن الحصول عليها من الجزء الحقيقي لنظرية الإستطاعة المؤشرة:

$$\frac{1}{2} \int_V (\omega \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* + \omega \mathcal{E} \cdot \mathbf{E} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) dV, \quad (17)$$

حيث μ تمثل المركبة التخيلية للسماحية المغناطيسية و σ تمثل الناقلية. في المواد العازلة، تكون عادة السماحية المغناطيسية صغيرة و الطرف الأول يمكن إهماله. إضافة إلى هذا يمكن إعتبار $\omega \mathcal{E}$ كناقلية مكافئة [31]. إذا أفترض أن الحقل الكهربائي منتظما في كل الحجم، معادلة الإستطاعة المبسطة، P ، الممتصة في وحدة الحجم يمكن الحصول عليها من المعادلة (17):

$$P = 2 \pi f \epsilon'' E^2. \quad (18)$$

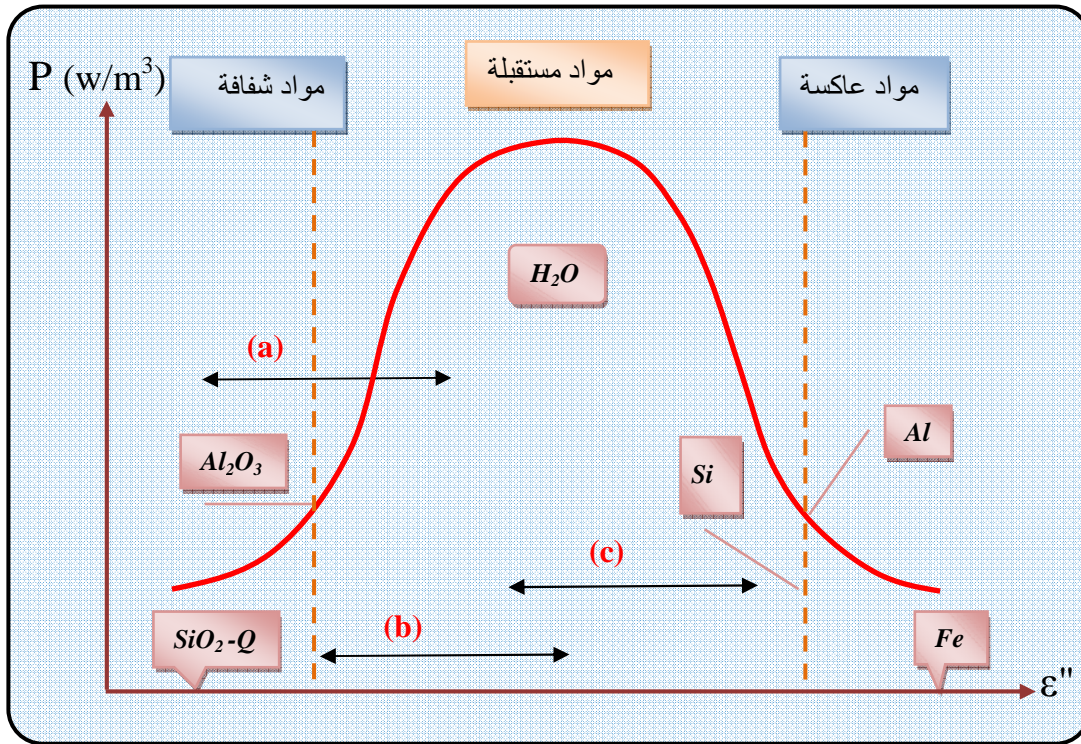
كون أن الطاقة تمتص داخل المادة، فإن شدة الحقل الكهربائي تتخفض كدالة في البعد بين سطح المادة و العمق المبلوغ. لهذا السبب، المعادلة (18) صحيحة فقط للمواد الرقيقة جدا. إن عمق التوغل (النفوذ) معرف بالمسافة بين سطح العينة و حيث تكون الإستطاعة الممتصة مساوية $1/e$ من الإستطاعة الممتصة عند السطح. أبعد من هذا العمق، التسخين الحجمي الناتج عن طاقة موجة الميكرو يكون مهملا. بإفتراض أن ثابت العزل هو ϵ_0 ، يعطى عمق التوغل بالمعادلة التالية:

$$d = \frac{C \epsilon_0}{2 \pi f \epsilon''}. \quad (19)$$

إن معرفة عمق التوغل و الكيفية التي ينخفض بها الحقل الكهربائي، إبتداء من السطح، ذات أهمية خاصة في معالجة المواد السمكية (الثخينة). إذا كان عمق توغل موجة الميكرو أقل بكثير من ثخن المادة، فإن السطح فقط هو الذي سيسخن، أما باقي العينة فيسخن عن طريق ظاهرة النقل الحراري. تظهر المعادلة (19) إرتباط عمق التوغل بالتردد العامل. كما ذكر آنفا، يتم إنجاز إنتظاما أكبر في المطبقات متعددة الأنماط بالإشتغال عند ترددات أعلى و يكون هذا على حساب عمق التوغل.

تقدم المعادلتان (18) و (19) معرفة بأي المواد العازلة تلك، التي تناسب المعالجة بموجات الميكرو. إن المواد ذات الناقلية و السعة المنخفضة (مثل المعادن) لديها معاملات فقدان عالية للعازلية. كلما صار معامل

فقدان العازلية كبيراً جداً، كلما إقترب عمق التوغل إلى الصفر. إن المواد التي تبدي هذا السلوك العزلي تعتبر عواكسا لموجات الميكرو. إن المواد ذات معاملات فقدان العازلية المنخفضة تملك عمق توغل كبير جداً، وكنتيجة لهذا تمتص المادة مقداراً قليلاً جداً من الطاقة، و هكذا تكون المادة شفافة لطاقة موجة الميكرو. بسبب هذا السلوك، تحول موجات الميكرو بفعالية أكبر إلى المواد التي تملك معاملات فقدان للعازلية في منتصف مجال الناقلية (شكل 9-I). على العكس من هذا، يحول التسخين التقليدي الحرارة بصورة أكثر فعالية في المواد التي تملك ناقلية عالية.



الشكل 9.I : العلاقة بين معامل فقدان العازلية ϵ'' والاستطاعة الممتصة في وحدة الحجم P (قابلية امتصاص للميكرويف) لبعض المواد الشائعة. (a) المواد اللدنة بالحرارة، (b) سوائل صمغية، (c) سوائل التحليل الكهربائي.

إن تكن المعادلتان (18) و (19) صالحتان في تقدير أثر الخصائص الكهربائية على إمتصاص إستطاعة موجة الميكرو، فإن معالجة المادة في حد ذاتها مسألة غاية في التعقيد. تتعلق الخواص العزلية بحركة ثنائيات الأقطاب داخل البنية، وبالتالي تكون الخواص العزلية تابعة (دالة) لدرجة الحرارة، التردد، و درجة التفاعل من أجل الأنظمة المتفاعلة. بالتالي تتغير مقدرة المادة على إمتصاص الطاقة أثناء المعالجة. على سبيل المثال، يملك كربيد السيلكون (SiC) عند درجة حرارة الغرفة معامل فقدان يقدر بـ 1.71 عند 2.45 جيجا هيرتز. في حين معامل الفقدان عند 695°C من أجل نفس التردد يقدر بـ 27.99 [45].

يمائل إنزياح طور التيار، في الدارات الكهربائية، الكيفية التي تتبدد بها الطاقة داخل المواد. كما ذكر من قبل، تأخر ثنائي القطب وراء الحقل الكهربائي ناتج عن قوى داخلية في المادة. إن إنزياح الطور، δ ، بين إنتقال ثنائي القطب و الحقل الكهربائي ينتج عنه فقدان العازلية. إن مركبة طور إنتقال ثنائي القطب مع الحقل الكهربائي هي الإستطاعة الممتصة كحرارة من قبل المادة العازلة. في الدارات الكهربائية ذات التيار المتناوب، يكون التيار غير متفق في الطور مع التوتر. الإستطاعة المركبة هي جداء التيار المركب و التوتر [46].

$$S = V^* I^*, \quad (20)$$

حيث S تمثل الإستطاعة المركبة. إذا أعيد كتابة المعادلة السابقة بحدي السعة المركبة، كما عرف ذلك من قبل، فإنه يمكن كتابة المعادلة التالية:

$$S = i\omega C^* V V^*, \quad (21)$$

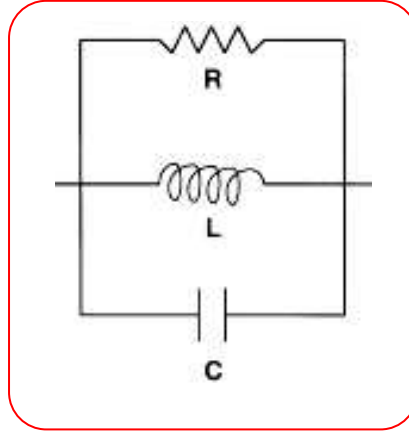
حيث يمثل الجزء الحقيقي تبديد الإستطاعة في الدارة الكهربائية (شكل 6 (a)). و هذا يماثل نظرية الإستطاعة المؤشرة في العوازل.

I-4.4 قياس الخواص العزلية

بسبب أن الخواص العزلية تحكم مقدرة المواد على أن تسخن بحقول موجات الميكرو، فإن قياس هذه الخواص كدالة في درجة الحرارة و التردد و ومعاملات أخرى وثيقة الصلة بالموضوع يكون مهما. العديد من المؤلفين [47-49] درسو تقنيات مختلفة لقياس الخواص العزلية عند ترددات الميكرو. إن أشهر التقنيتين المستعملتان في قياس الخواص العزلية هما: حجرة التجاوب، أو طريقة حجرة الإضطراب (quavity perturbation method)، و طريقة الإرسال و الإنعكاس. في طريقة حجرة التجاوب، نسبة الطاقة المخزنة داخل الحجرة إلى الطاقة الضائعة (غالبا ما يشار إليها بالتنوع أو بالمعامل- Q) تقاس في حجرة فارغة بداخلها مادة صغيرة الحجم. بسبب أن أنظمة موجات الميكرو غالبا ماتصمم بالإعتماد على إستبدال مكونات النظام بدارات كهربائية مكافئة [17]، فإن المعامل- Q مؤسس على نظرية دارة التجاوب RLC (مقاومة- وشيعة- مكثفة) (شكل I-10). يعطى المعامل- Q لدارة RLC على التسلسل بالعلاقة التالية [46]:

$$Q = R \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (22)$$

إن إضافة العينة داخل الحجرة يخلق اضطراباً في الحقل الكهرومغناطيسي، ويغير R ، L ، C و بسبب ذلك تتغير ممانعة الدارة المكافئة. إن التغيرات الحاصلة في المعامل- Q و تردد التجاوب للحجرة يمكن أن يعزى إلى ثابت العزل و ظل (زاوية) الفقدان للمادة. أما في طريقة الإرسال و الإنعكاس، توضع المادة في موجه موجة و يدرس طور و سعة الموجات المرسل و المنعكسة. الاختلافات الحاصلة على مستوى هذه الموجات



الشكل 10.I: دارة RLC على التوازي.

تعطي معلومات على الخواص العزلية. من أجل قياس الخواص العزلية للخزفيات عند درجات الحرارة العالية، فإن المعاملات (كقياس دقيق لدرجة حرارة) تعقد من عملية قياس الخواص العزلية بإستعمال هذه الطرق [48].

5-I الخزفيات و أنسجة الخزفيات المركبة

إن المواد التي لقيت إهتماماً كبيراً بالمعالجة بموجات الميكرو هي الخزفيات. بسبب أن الخزفيات تملك ناقلية حرارية منخفضة و تعالج عند درجات حرارة مرتفعة، حاول العديد من الباحثين الإستفادة من ميزة التسخين الحجمي في التلبيد، الترشيح الكيميائي للبخار (CVI)، pyrolysis of polymer precursors و تطبيقات أخرى تشمل على معالجة الألياف الملحمة [18-19، 50]، [28-29]، و plasma pyrolysis [51].

1.5-I سلوك المادة

إن العديد من الخزفيات مثل كارباید السلكون (SiC) و أكسيد المغنيزيوم (MgO)، لديها خواص عزلية تناسب المعالجة بموجات الميكرو. مواد أخرى، ككتريد السلكون (Si₃N₄) و الألومينا (Al₂O₃)، ضعيفة الإمتصاص لموجات الميكرو إلى غاية درجة حرارة حرجة. فوق هذه الدرجة، يبدأ معامل فقدان العازلية بالزيادة، وتبدأ المادة بالتزاوج مع موجات الميكرو [52]. إن الخزفيات التي يجب عليها بلوغ درجة حرارة

حرجة قبل أن تتزوج مع موجات الميكرو تبيدي بعض الصعوبات في المعالجة. قبل بلوغ درجة الحرارة الحرجة، لدى هذه المواد معاملات فقدان منخفضة جداً، وبالتالي، تسخن في حقل موجة الميكرو ببطء شديد. عندما تعالج الخزفيات في حقول كهرو مغناطيسية 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 التسخن بسرعة أكبر، و درجة الحرارة تبدأ في الإرتفاع أكثر فأكثر. يمكن أن ينتج عن هذا تسرب حراري متموضع الذي يتسبب في إنتاج توترات عالية بكفاية لإحداث تصدع بالمادة [53]. يمكن إستعمال التسخين الهجين (المختلط) لمساعدة المواد المعالجة التي تبدي هذا السلوك. فقبل بلوغ درجة الحرارة الحرجة، تسخن الخزفية عبر تحويل الحرارة. و بما أن المادة تبدأ في التسخن، ومعامل فقدانها يزداد، فإنها تبدأ في التزوج بفعالية أكبر مع موجات الميكرو.

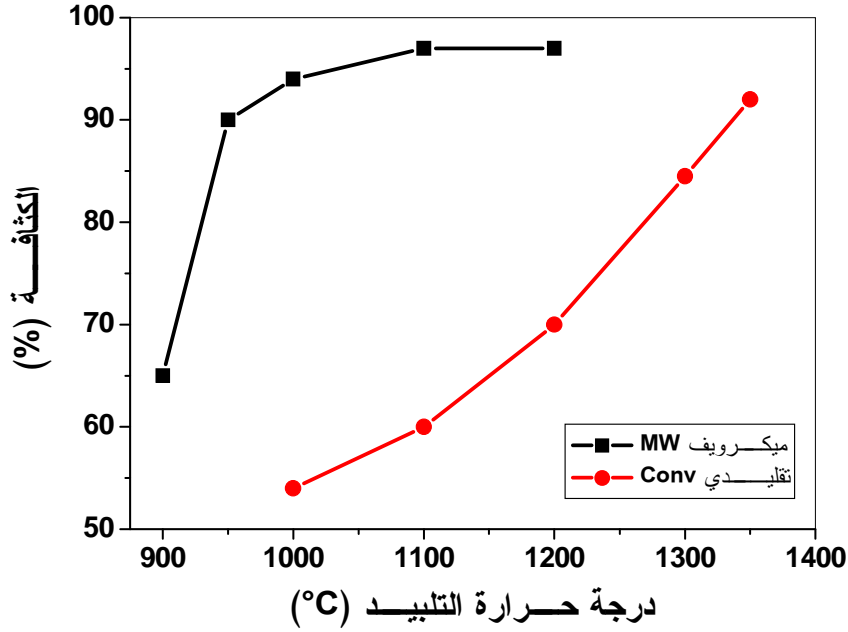
2.5-I معالجة الخزفيات

إن الكثير من الأبحاث المتعلقة بمعالجة الخزفيات عن طريق موجات الميكرو أنجزت على التليبيد. في المعالجة التقليدية للخزفيات، يدمج المسحوق الخزفي تحت ضغط عالي إلى الشكل المرغوب. يتلو ذلك تليبيد عند درجة حرارة عالية. أثناء التليبيد تلتحم جزيات الخزف ببعضها و تتقلص تدريجياً نسبة الفجوات التي نتجت عن دمج الجزيات. في المعالجة الحرارية (التقليدية) تلدن الخزفيات في فرن ذا حرارة عالية. بما أن المادة تسخن إنطلاقاً من السطح، فإن تدرجات حرارية شديدة يمكن أن تنتج. في المعالجة بموجات الميكرو، حيث تسخن المادة مباشرة و في آن واحد، تخفض التدرجات الحرارية.

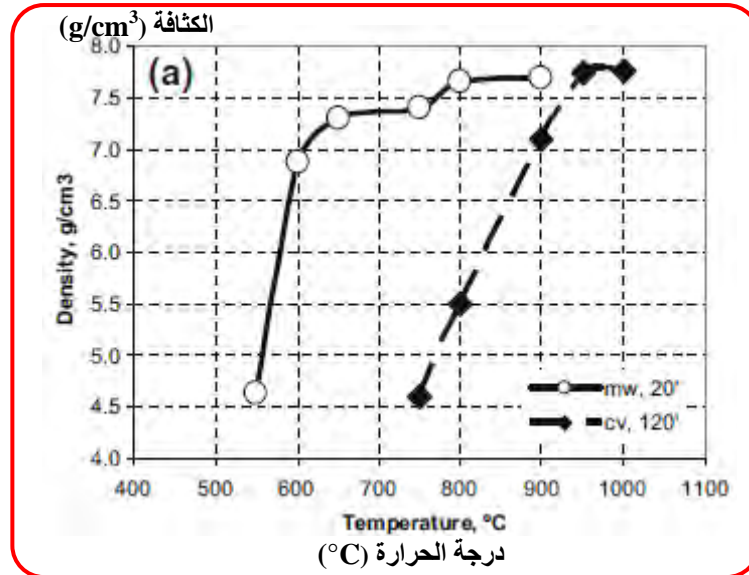
في الحقيقة، غالباً ما يكون للخزفيات المعالجة بموجات الميكرو تدرجات حرارية عكسية (مقلوبة) ناتجة عن فقدان الحرارة بالإشعاع و الحمل من سطح الخزفية إلى الحجرة غير المسخنة. لتفادي التدرجات الحرارية العكسية الشديدة، غالباً ما يعزل سطح الخزفية عن الحجرة غير المسخنة. إن الخزفيات حساسة بالخصوص للتدرجات الحرارية لأن، التوترات الحرارية يمكن أن تكون عالية بكفاية ليبدأ ظهور تصدع (تشقق) في الخزفيات الهشة.

قدم العديد من الباحثين أبحاثاً حول تقليص مهم لزمان المعالجة بموجات الميكرو مقارنة بالتليبيد التقليدي [4، 53-83]. قاد كل من جاني و كيمري [4] أبحاثاً على تليبيد الألومينا بموجات الميكرو. ففي الشكل I-11 النسبة المئوية للكثافة النظرية للألومينا المعالج بموجات الميكرو و التسخين الحراري التقليدي من أجل نفس الفترة (50°C/min، بزمن مكوث يقدر بـ 1 Hr) مبينة كدالة لدرجة حرارة التليبيد. إن الشكل I-11 يثبت بوضوح أن هناك تسارع في تكثيف المادة المعالجة بموجات الميكرو. تزداد كثافة مادة الألومينا الملبدة بموجة الميكرو بسرعة مع درجة الحرارة مقارنة بالألومينا المعالج حرارياً. كما أظهرت تجارب حديثة،

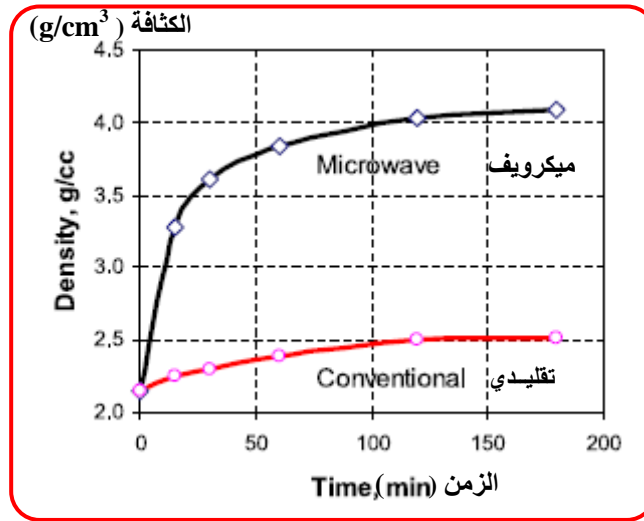
تؤكد النتائج السابقة، قام بها فانغ وزملاءه على مواد كهرو خزفية [74] تفر بزيادة في حركية التكتيف و تخفيضاً معتبراً في درجة حرارة التلييد قدر بـ 100°C و 400°C بالإضافة إلى تقليص في مدة التلييد بالميكرويف بحوالي 90% مقارنة بالمعالجة التقليدية (شكل 12 و 13).



الشكل 11.I: تغير الكثافة الحجمية بدلالة درجة حرارة التلييد للألومينا Al_2O_3 الملبدة في فرن الميكرويف (MW) و في فرن تقليدي (Conv) لمدة ساعة [4].



الشكل 12.I: تغير الكثافة الحجمية بدلالة درجة حرارة التلييد لمادة الـ $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT) الملبدة في فرن الميكرويف (mw) لمدة 20 دقيقة و في فرن تقليدي (cv) لمدة 120 دقيقة [74].



الشكل 13.I: تغير الكثافة الحجمية بدلالة زمن التلبيد لمكثفة متعددة الطبقات (MLC)، مصنوعة من مادة COG العازلة، ملبدة في فرن الميكرويف (MW) و في فرن تقليدي (Conv) [74].

لقد حددت تجارب إضافية تدرس الحركية المتعلقة بعملية تحويل-الكتلة المنشطة حرارياً في التلبيد أن طاقة تنشيط الألومينا الملاحظة في عملية المعالجة بموجة الميكرو كانت أقل بحوالي 70 % من طاقة التنشيط باستعمال المعالجة التقليدية. هذه الزيادة في سرعة التلبيد غالباً ما يعلق عليها بـ " أثر موجة الميكرو". حاولت دراسات أخرى أجراها عدد من الباحثين تطوير نماذج حسبت لصالح هذه الآثار الحرارية لموجات الميكرو. من أجل تفسير الزيادة في سرعة التلبيد، طور ويلر- بورادا [86] نموذجاً مؤسساً على التوازن التيرموديناميكي للفجوات (الفراغات) المحيطة بالحبيبات تحت تأثير حقل كهربائي خارجي. ينتج عن الا تجانس العزلي للخزفية زيادة في الحقل الكهربائي عند السطوح المحدبة داخل الفجوات. زيادة موضعية في الحقل الكهربائي تحسن من تدفق المادة عند السطوح المحدبة و تؤثر في قوة الجر الموضعية للتكثيف. أنجز كلام و زملاؤه [87] حسابات على زيادات الحقل الكهربائي في البنية المجهرية للخزفيات ذات العنق الكروي (spherical neck ceramic) و قرراً أن قمم شدات الحقل الكهربائي في البنية المجهرية يمكن أن تكون أعلى بكثير من شدة الحقل المطبق.

بالإضافة إلى زيادة سرعة التلبيد، فإن التلبيد بموجات الميكرو ينتج عنه غالباً زيادة في الخواص الميكانيكية. نتيجة للتدرجات الحرارية المخفضة في التلبيد بموجات الميكرو، فإن عملية-إحداث التوترات تكون أقل حدة. زيادة على هذا، فإن إنتظامية البنية المجهرية للخزفية يمكن أن تحسّن عن طريق التسخين بموجات الميكرو. بسبب أن دورات التلبيد تستغرق وقتاً أقصر و أن التدرجات الحرارية تخفّض، فإنه يمكن الحصول على حبيبات ذات حجم أصغر و إنتظامية أكبر في حجم الحبيبات و معامل الشكل [85]. ينتج عن الإنتظامية الأكبر في البنية المجهرية تبديد منخفض في الخواص الميكانيكية.

في أكثر التقنيات التقليدية المستعملة في معالجة الخزفيات المركبة (ceramic matrix composite) يتم ترشيح شكل ليفي أولي (مسبق) بمسحوق خزفي أو (slurry). يكبس، بعد ذلك، المركب أو يقولب إلى الشكل المرغوب متنوع بعملية تكثيف. هذه العمليات يمكن أن تضر بالعينة الأولية (ذات الشكل الأولي) و بالتالي، تخفض من نوعية المنتج النهائي. تعتبر عملية الترشيح الكيميائي للبخر جذابة لتصنيع الخزفيات (matrix composite) والمركبات كربون/كربون لأن غاز التفاعل يقوم بترشيح العينة الأولية و تقوم الأبخرة بوضع (ترسيب) الأطوار الصلبة على الألياف لتشكيل البنية الأم للخزفية (ceramic matrix). بسبب أن تفاعل التفكك للبخر يحدث بأكثر سرعة عند درجات الحرارة الأعلى، يتوضع الطور الصلب بشكل تفضيلي في المناطق الأكثر سخونة و ذلك عند وجود التدرجات الحرارية. ينتج عن هذا كثافة غير منتظمة، نسبة فراغات عالية، و أزمنة معالجة طويلة عندما يكون للمواد تدرجات حرارية تقليدية. كما ذكر من قبل، غالبا ما يوجد تدرج حراري معكوس في المعالجة بموجة الميكرو ناتج عن تحول الحرارة من السطح. في موجة الميكرو المدعمة بالـ CVI، هذا التدرج الحراري المعكوس يمكن أن يستغل لتحفيز ترشيح البخار (vapor infiltration) داخل العينة الأولية (preform). ينتج عن هذا تكثيف للمركب المبتدئ داخل العينة الأولية.

محاكات رقمية لعملية الـ CVI أثبتت كذلك أن المقدرة على خلق تدرجات حرارية معكوسة يمكن أن ينتج عنه ترسب أكثر فعالية للمادة (matrix) [88]. قام موريل وزملاؤه [89] بإستثمار إستعمال موجات الميكرو لمعالجة المركبات الكربونية عبر تنبيض إستطاعة موجة الميكرو. بسبب أن التسخين الحجمي يكون لحضيا عندما يشغل حقل موجة الميكرو، فإن العينة الأولية يمكن أن تسخن بسرعة إلى غاية درجة حرارة التفاعل، و عندما يوقف تشغيل إستطاعة موجة الميكرو تخفض درجة حرارة العينة الأولية و يسمح للغاز الأكثر تفاعل بالانتشار داخل فراغات العينة الأولية. إضافة إلى هذا، أثبت تينغ وزملاؤه [90] أن موجات الميكرو قادرة على رفع الترشيح داخل عينات الكربون الأولية إلى أعماق تزيد عن 2.5 mil.

أظهرت تقنيات جديدة أخرى لتصنيع المركبات الخزفية وعودا لأبحاث المستقبل في ميدان المعالجة بموجات الميكرو. فالـ pyrolysis of polymeric precursors أستعملت منذ عدة سنوات لإنتاج المركبات كربون-كربون، كما أعطيت حديثا عناية لـ pyrolysis of pre-ceramic polymer من أجل معالجة المركبات الخزفية. إن تطبيق التسخين بموجات الميكرو لإنتاج المركبات كربون/كربون بين أن مواد عالية الجودة يمكن إنتاجها بتخفيض مهم لمدة المعالجة [92]. في الدراسات الأولية للمركبات الخزفية، أستعملت إستطاعة موجة الميكرو في الـ pyrolysis polycarbosilane لإنتاج كاربيد السلكون [93]. كما هو الحال في نتائج التليبد، فإن أزمنة المعالجة صارت أقصر. كما أن إستعمال التسخين بموجة الميكرو وجد أنه يزيد في تبلور المادة عند درجات حرارة أخفض مقارنة بالـ pyrolysis التقليدي.

6-I ملخص

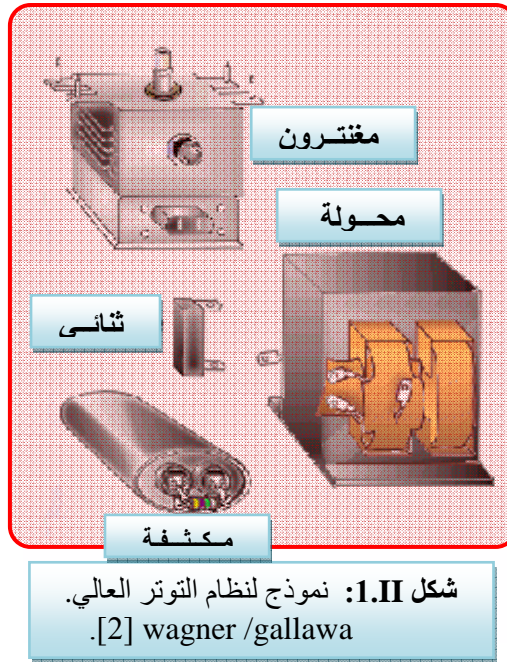
رأينا في هذا الفصل أن المادة، المعالجة بموجات الميكرو، تتزود مباشرة بطاقة الحقل الكهرومغناطيسي، و ينتج عن هذا الامتصاص تسخين سريع في ثخن المادة كلية مصحوب بتقلص في التدرجات الحرارية. التسخين الحجمي هذا يمكنه كذلك أن يقلص في أزمنة المعالجة ويوفر الطاقة. كما أن حقل موجات الميكرو والاستجابة العزلية للمادة تتحلمان في مقدرة هذه الأخيرة على تسخين نفسها بطاقة موجات الميكرو. فمعرفة النظرية الكهرومغناطيسية و الاستجابة العزلية مهم لبلوغ معالجة مثلى للمواد عبر التسخين بموجات الميكرو.

نظام التوتر العالي و سلامة طاقة الميكرويف

الفصل 2

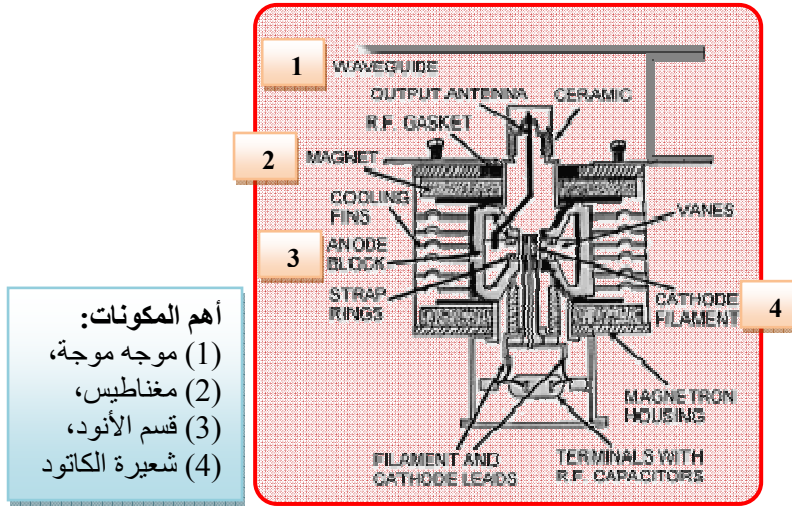
1-II مقدمة

إن هدف وجود نظام التوتر العالي شكل 1.II في فرن الموجات هو من أجل توليد طاقة الميكرويف. فهو بمثابة قلب فرن موجات MW يقوم ب: رفع توتر خط التيار المتناوب AC إلى توتر عالي (HV)، يغير التوتر العالي للتيار المتناوب AC إلى تيار مستمر DC ذو توتر عال أيضا و من ثم يحول استطاعة التيار المستمر إلى طاقة إشعاع تموجية RF. يعتبر أنبوب المغنترون نواة نظام التوتر العالي.



2-II أنبوب المغنترون

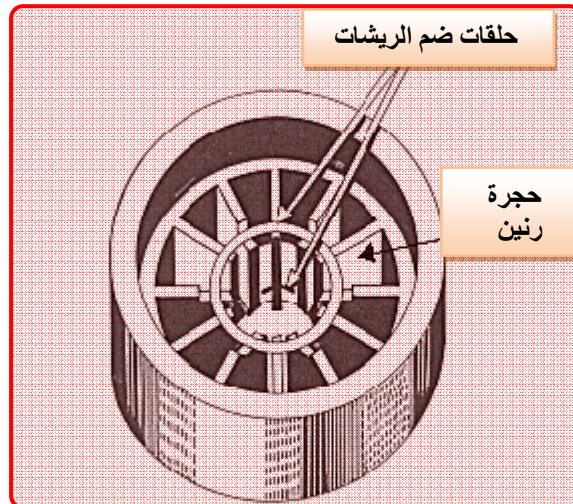
يشبه أنبوب المغنترون أنبوب الكتروني من نوع ثنائي (diode-type) يستعمل لتوليد التردد 2450 MHz (2.45 GHz) لطاقة موجات الـ MW. تم تصنيفه كثنائي لأنه لا يشمل على شبكة، كما هو الحال في الأنبوب الالكتروني العادي. يطبق حقل مغناطيسي في الفضاء بين الانود (صفيحة) و الكاثود الذي يعمل على شكل شبكة. يمثل الشكل 2.II منظر لمقطع أنبوب مغنترون نموذجي. بالرغم من أن التشكيلات الخارجية لمختلف أنواع المغنترونات تتغير من نموذج صنع لآخر إلا أن البنية القاعدية الداخلية تبقى نفسها. تشمل هذه البنية على الأنود، الشعيرة/الكاثود، الهوائي و المغناط [95،94].



أهم المكونات:
 (1) موجه موجة،
 (2) مغناطيس،
 (3) قسم الأنود،
 (4) شعيرة الكاثود

شكل 2.ii : منظر لمقطع مغنطرون نموذجي
 Courtesy of Michael S.Wagner [95].

1.2-II الأنود: إن الأنود عبارة عن تجويف أسطواني مصنوع من الحديد، تمتد منه عدد معين من الريشات نحو الداخل كما هو مبين في الشكل 3.II. إن المجالات المفتوحة ذات شكل شبه منحرف بين الريشات تدعى فجوات الرنين التي تلعب دور دارة موالفة أو تناغم والتي تحدد تردد الخروج لأنبوب المغنطرون. يعمل الأنود بطريقة تكون معها القطع المتناوبة وكأنها موصولة بحيث كل جزء يكون معاكسا في القطبية للأجزاء الأخرى المقابلة. تكون الفجوات في الحقيقة موصولة على التوازي بالأخذ بعين الاعتبار للمخرج.



شكل 3.II : نموذج لقسم الريشات في الأنود.
 Courtesy of Michael S .Wagner [95].

II-2.2 الكاتود: عبارة عن سلك أو شعيرة التسخين يوجد في مركز المغنترون مدعم بمثبت الشعيرة العريض و الصلب مسدود بإحكام و محجوب داخل الأنبوب.

II-3.2 الهوائي: هو مجس أو عروة موصولة بالأنود و تمتد داخل واحدة من حجرات الموالفة (الرنين) و يكون مقترنا بموجه الموجة أين ينقل إليه طاقة الإشعاع الترددية RF.

II-4.2 الحقل المغناطيسي: يكون ممونا من مغناطيس دائم قوي مركب حول المغنترون بطريقة يكون الحقل المغناطيسي مواز لمحور الكاتود [94].

II-3 أساس عمل المغنترون (Basic Magnetron Operation)

ترتكز نظرية عمل المغنترون على حركة الالكترونات تحت تأثير الحقل الكهربائي و المغناطيسي. حتى يشتغل أنبوب المغنترون يجب على الالكترونات أن تتدفق من الكاتود إلى الأنود. يوجد قانونين أساسيين يتحكمان في هذه الحركة :

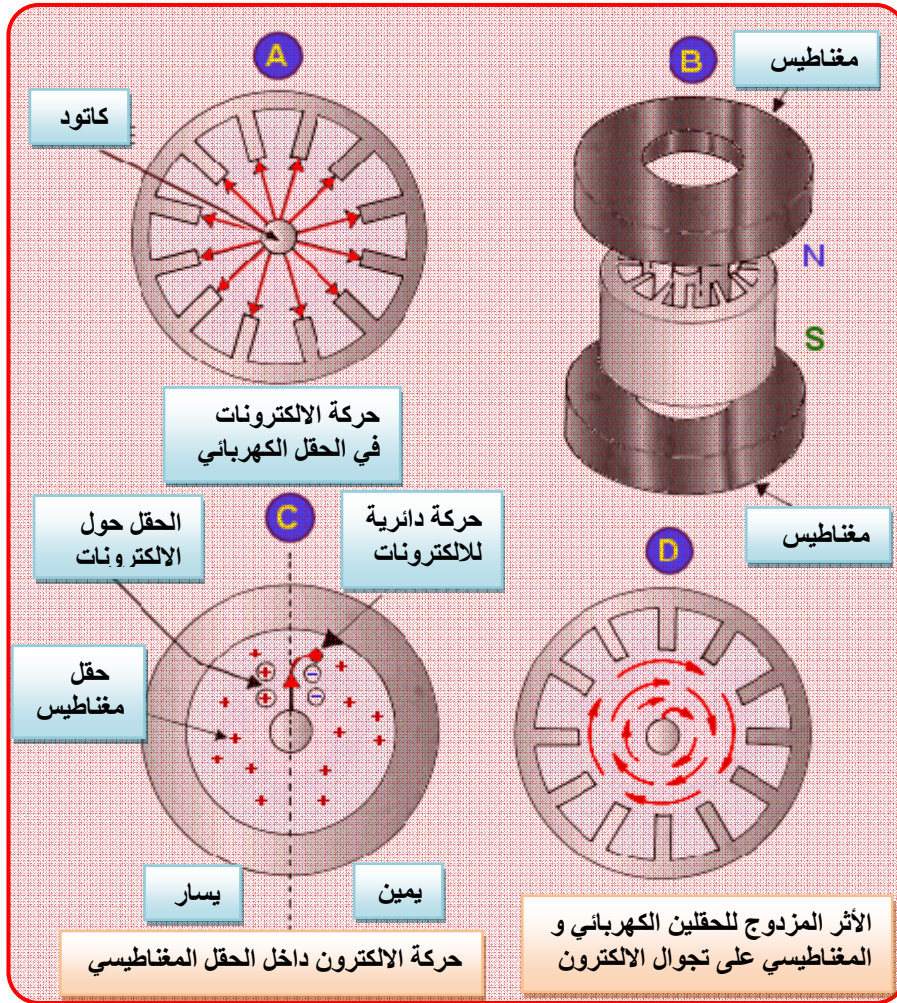
1. تتناسب ، القوة المطبقة من طرف حقل كهربائي على الكترون، طردا مع شدة هذا الحقل. تحاول الالكترونات التنقل من نقطة ذات كمون سالب باتجاه نقطة أخرى ذات كمون موجب. يظهر الشكل II-4.A حركة مستقيمة منتظمة للإلكترونات تحت تأثير حقل كهربائي، من الكاتود السالب الشحنة إلى الأنود الموجب، في غياب حقل مغناطيسي.

2. تكون القوة الطبقة على إلكترون، تحت تأثير حقل مغناطيسي، عمودية (بزوايا قائمة) على كلا من الحقل المغناطيسي في حد ذاته و اتجاه حركة الإلكترون.

إن اتجاه القوة يكون بشكل يتقدم فيه الإلكترون نحو الأنود متخذا مسارا منحنيا عوض أن يكون في طريق مستقيم [94].

II-1.3 تأثير الحقل المغناطيسي

في الشكل II-4.B تم إضافة مغناطيسيان دائمان فوق و أسفل بنية أنبوب المغنترون. يفترض الشكل II.B 4 أن المغناطيس العلوي يمثل القطب شمالي (N) و المشاهد ينظر من هذه الوضعية. اما القطب الجنوبي (S) فيوجد أسفل الشكل بحيث يكون الحقل المغناطيسي يخترق ورقة الشكل. تماما كما ينجم عن تدفق الإلكترونات



شكل 4.II : حركة الإلكترون في أنبوب المغنطرون (Wagner/Gallawa).

عبر سلك صلب حقلًا مغناطيسيا حول هذا الأخير، فإن إلكتروناتنا يتحرك عبر فراغ ينزع إلى خلق مجال مغناطيسي حول نفسه. يضاف هذا الحقل المغناطيسي المحدث ذاتيا إلى الحقل الدائم من الجانب الأيسر من مسار الإلكترون أما من الجانب الأيمن من مسار ه فإن الحقل المحدث ذاتيا لديه أثر معاكس، أي أنه يطرح من الحقل المغناطيسي الدائم. وبالتالي يضعف الحقل المغناطيسي من الجانب الأيمن فينحني مسار الإلكترون من هذه الجهة مما ينتج عنه حركة دائرية لتجوال الإلكترون نحو الأنود.

تبدأ العملية بتطبيق فلطية منخفضة على الشعيرة يتسبب هذا في رفع حرارتها (اعتياديا تكون قيمة فلطية الشعيرة من 3 إلى 4 VAC، يتعلق هذا بالصانع و النموذج). من المهم تذكر أن الشعيرة تمثل كذلك

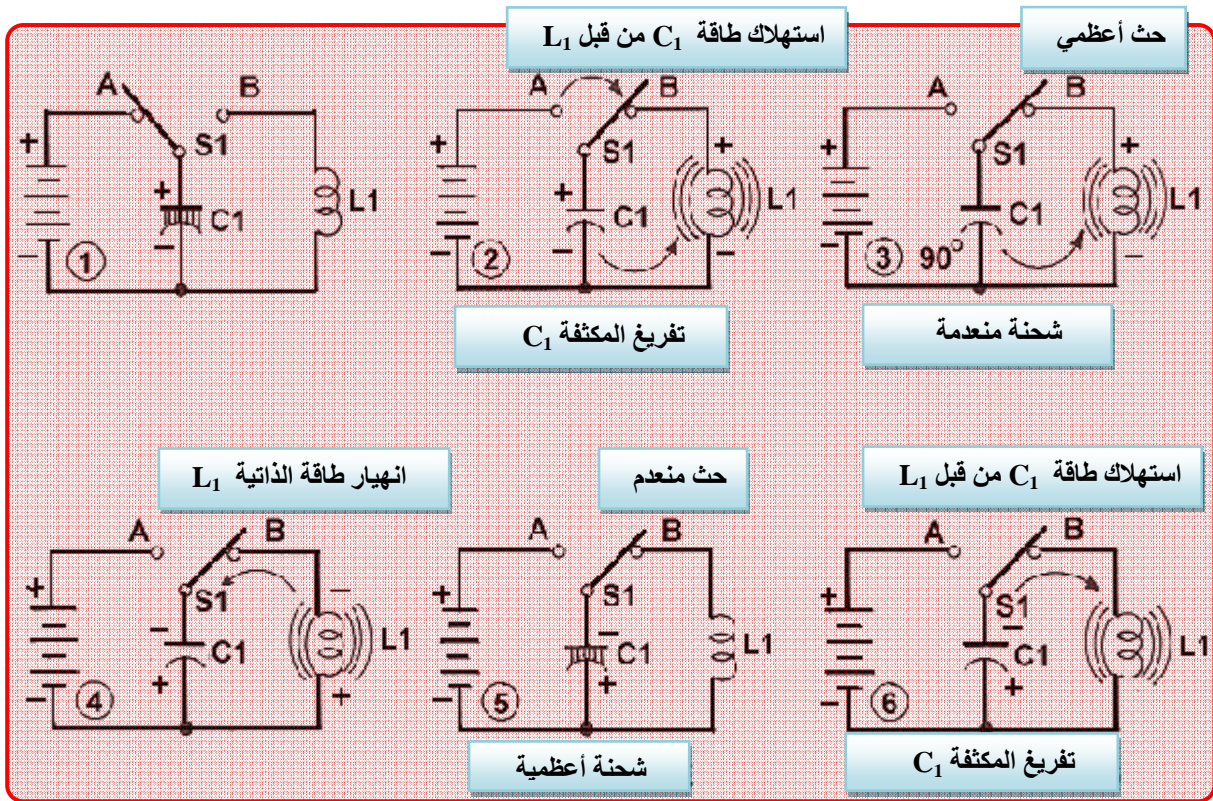
الكاتود. يتسبب ارتفاع درجة الحرارة في زيادة نشاطية الجزيئات داخل الكاتود إلى مستوى تبدأ فيه بالإرتجاج و بعث إلكترونات. يمكن مقارنة الإلكترونات المغادرة لسطح سلك الشعيرة المسخن بالجزيئات المغادرة لسطح الماء المغلى على شكل بخار. لكن الإلكترونات لا تتبخر بل تطفو على سطح الكاتود منتظرة لعزم حركي يقلعها من هذا المكان.

تتنافر سحابة الإلكترونات الطافية (العائمة) على السطح بشدة مع الشحنات السالبة داخل الكاتود. تزداد كل من مسافة و سرعة الترحال مع زيادة شدة الشحنة السالبة المطبقة على الكاتود. بالتالي ينتج عزمًا حركيًا ممونًا بتوتر سالب يقدر بحوالي 4000 volts DC الذي ينتجه المحول عالي التوتر و الفعل المضاعف للثنائي و المكثفة. من البديهي أن الكمون السالب 4000 volts على الكاتود سيقابله كمونًا موجبًا بـ 4000 volts على الأنود. بالتالي تغادر الإلكترونات المنطقة المجاورة للكاتود متسارعة خطيًا باتجاه الأنود الموجب تحت تأثير قوة الحقل الكهربائي، لكن هذه الحركة المستقيمة للإلكترونات لا تستمر طويلاً بسبب ما تلاقيه من تأثير للحقل المغناطيسي الشديد الذي يحرفها عن مسارها المستقيم كما شرحنا سابقاً. يظهر الشكل D.II-4 فعل الحقل المغناطيسي على مسار الإلكترون [94].

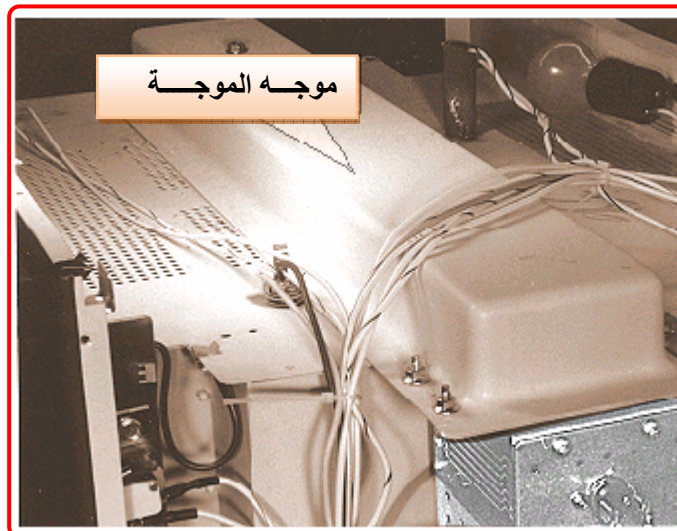
II-2.3 دارات الموالفة (Resonant Cicuits)

تتكون دارات الموالفة من وشيعة و مكثفة موصولة على التوازي وظيفتها توليد تدفق تيار عالي التردد كما هو مشروح في الشكل 5.II. في الخطوة الأولى تبدأ البطارية في شحن المكثفة C_1 . الخطوة الثانية عندما تأخذ القاطعة S_1 الوضعية B تنفرغ المكثفة عبر الوشيعة L_1 . التيار المتدفق عبر الوشيعة يتسبب في توليد حقل مغناطيسي حول الوشيعة الذي يكون مسحوباً بتوتر داخلي محث ذو قطبية معاكسة لتفرغ المكثفة. في الخطوة الثالثة تكون المكثفة C_1 قد تفرغت بالكامل و الطاقة الآن مخزنة في الحقل المغناطيسي المحيط بالوشيعة. في الخطوة الرابعة يبدأ الحقل المغناطيسي بالانهيار حول الوشيعة مما يتسبب في تغير قطبية التوتر المحث داخل هذه الأخيرة. تبقى هذه العملية على تدفق التيار في الاتجاه الأصلي، الذي في الخطوة الخامسة يشحن المكثفة بقطبية معاكسة لشحنة المكثفة الأصلية. و هكذا، في الخطوة السادسة تنفرغ المكثفة مرة أخرى في الوشيعة في الاتجاه المعاكس لتبدأ العملية من جديد. تولد عملية تأرجح التيار هذه إهتزازات عالية جداً ذات ترددات تحددها قيمة المكثفة و الوشيعة.

داخل كل حجرة رنين في أنبوب المغنترون تقوم الجدران بدور وشيعة (أو المحث) و الجهات المتوازية للأشكال المفتوحة تلعب دور لبوسي مكثفة (شكل 8). و بما أن مقدار سعة المكثفة وذاتية الوشيعة صغير جداً فإن تردد التيار المتناوب الموافق يكون عال جداً. يعترض الهوائي الاهتزازات الكهرومغناطيسية المتولدة في حجرات الرنين ثم يقوم بإقران طاقتها بموجه الموجة [94].



شكل II.5 : مبدأ عمل دائرة الموالفة [94].



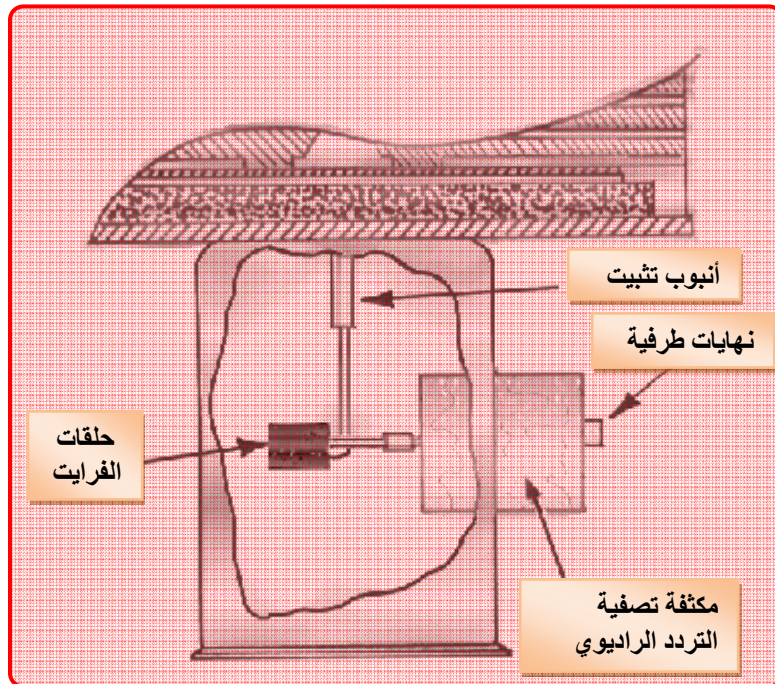
شكل II.6 : موجه الموجة عبارة عن أنبوب مجوف مستطيل الشكل [94].

3.3-II موجة الموجة (Waveguide)

ليس بمقدور طاقة الميكرويف الإنتشار عبر ناقل صلب، ولهذا يقوم الهوائي بإشعاع استطاعة التردد الراديوي RF داخل موجة الموجة. موجة الموجة عبارة عن أنبوب معدني مجوف (شكل II.6) ينقل طاقة الميكرويف إلى حجرة الفرن (المطبق).
أغلبية أفران الميكرويف تستعمل موجة موجة معدني ذو شكل مستطيل حيث تنتقل عبر هذا الأخير طاقة الميكرويف بالإنعكاس من جهة إلى أخرى متبعة مساراً متعرجاً [94].

4.3-II مكثفات التردد الراديوي (RF Capacitors)

بغية منع كمية قليلة من تيار التردد الراديوي من إحداث تغذية خلفية في شعيرة أنبوب المغنطرون، التي يمكن أن تتسبب في زيادة كبيرة للتداخلات الموجية للراديو و التلفزيون، يتم إضافة مكثفات و حلقات من الفرايت لأجزاء المغنطرون (شكل II.7). تعمل مكثفات التردد العالي على شكل مرشح يمرر أي تيار للتغذية الخلفية إلى الأرض. كما تكون حلقات الفرايت ذات خاصية مغناطيسية تمنع تدفق تيار التواتر العالي [94].



شكل II.7 : مكثفات الاشعاع الراديوي و حلقات الفرايت داخل أنبوب المغنطرون [94].

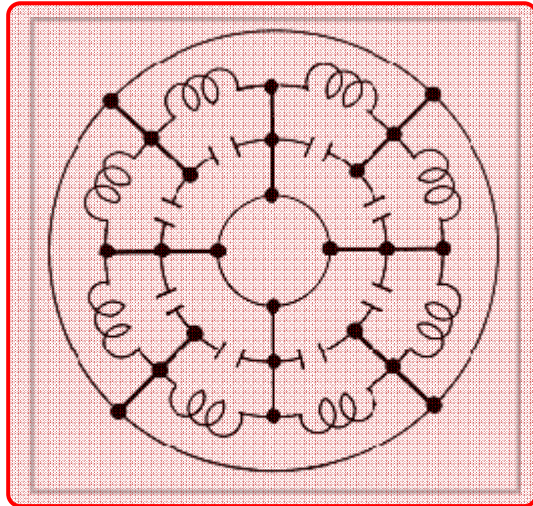
5.3-II زعانف التبريد (Cooling Fins)

توجد أجزاء بارزة أخرى في بنية المغنطرون تتمثل في زعانف (ريشات) التبريد. تقوم زعانف التبريد بتبديد الحرارة الهائلة التي يولدها المغنطرون أثناء اشتغاله. غالبا ما تبقي هذه الزعانف على درجة حرارة عمل المغنطرون في حدود 86°C (260°F).

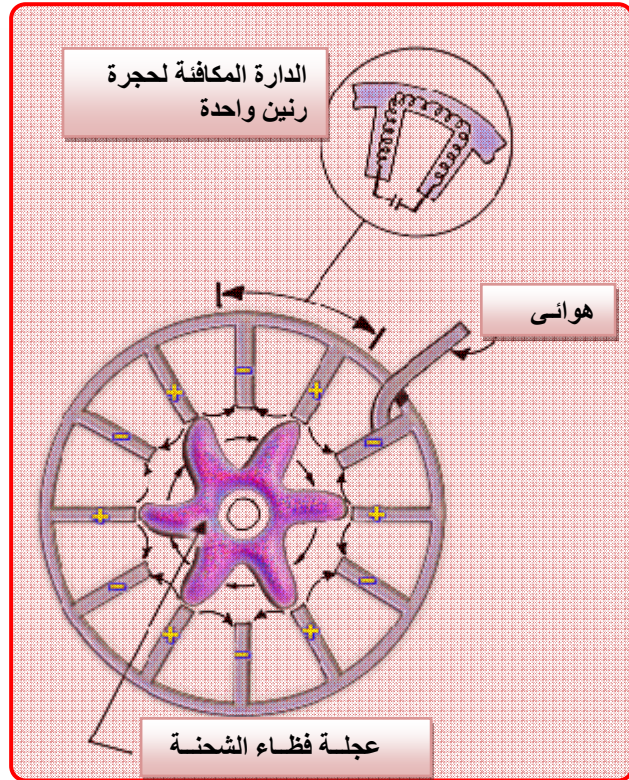
إن سحابة الإلكترونات الدوامة، التي يؤثر فيها كل من التوتر العالي و الحقل المغناطيسي، تشكل طيف دوار يشبه شعاع الدولاب في عجلة الغزل (شكل II.8). إن تفاعل هذه العجلة من شحنة الفضاء الدوامة بتشكيلة سطح الأنود ينتج عنه تدفقا لتيار متناوب في دارات الرنين للأنود. يمكن شرح هذا كما يلي:

عندما تقترب سحابة الإلكترونات الدوامة من أحد جدران الأنود (عنفة الأنود) (جزء بين فجوتين) فإنها تحدث شحنة موجبة في هذا الجدار الواقع بين فجوتين. عندما تمر الإلكترونات، فإن الشحنة الموجبة في الجدار الأول تنقص بينما شحنة موجبة أخرى تحت في الجدار الموالي.

يتم حث تيار لأن البنية الفيزيائية للأنود تشكل سلسلة من دارات رنين LC ذات معامل جودة Q عالي. إن أثر ضخامة الجدران المتناوبة المذكورة سابقا هو توصيل الدارات LC على التوازي (شكل II.9) [94].



شكل II.9 : الدارة المكافئة للحجرات تكون على التوازي بسبب الأربطة الناقلة [94].



شكل II.8 : تكون طيف دوران الإلكترون [94].

6.3-II مدة حياة المغنطرون (Magnetron life expectancy)

إن المدة النموذجية لحياة أنبوب المغنطرون مقدرة بحوالي 2000 Hrs (ساعة) من الاشتغال. هناك عدة عوامل تقلص من مدة حياة المغنطرون نذكرها في ما يلي:

(1) الاشتغال بدون حمل، (2) الاشتغال بوجود مواد معدنية كثيرة داخل حجرة التسخين، (3) الانخفاض و الارتفاع الكبير و المتكرر لخط التوتر المغذي للفرن، (4) تنصيب غير مناسب للفرن، (5) استبدال المكونات عالية التوتر بأخرى غير متوافقة مع تصميم النظام، (6) الاشتغال المستمر عند القيمة الحدية العظمى لحرارة المغنطرون الناجمة عن حركة الهواء الضعيفة، (7) إخفاق عمل آلة مزج حقل الميكرويف أو تعطل الطاولة الدوارة، (8) وجود عوائق في موجه الموجة [94].

4-II المحولات (Transformers)

تفيد المحولات، في داراة فرن الميكرويف، دورين الأول في رفع التوتر و الثاني تخفيضه. سيؤخذ بعين الاعتبار في هذا القسم إلا المحول الرافع للتوتر.

1.4-II المحول عالي التوتر (High-Voltage Transformer)

إن المحول عالي التوتر هو من النوع الرافع للتوتر ذو ملفان ابتدائي يمثل المدخل و ثانوي يمثل المخرج. يعمل بتوتر دخول يقدر بحوالي 120 إلى 240 VAC ($\pm 10\%$) مطبق على الملف الابتدائي و يقوم المحول برفع قيمة هذا التوتر إلى حدود 2400 VAC في الملف الثانوي [94].

5-II سلامة طاقة الميكرويف

1.5-II مقدمة

في عام 1926م ، كتب العالم السوفياتي في مجال الطبيعة Vernadskii ما يلي: نحن محاطون و مخترقون في كل الأوقات و في كل الأماكن بإشعاعات لا نهائية متضادة و مركبة و متغيرة بمختلف أطوال الموجات. و يشير العالم إلى الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الشمس و مصادر أخرى من المجرة التي وجدت طريقها إلى غلافنا الجوي. لم يكن العالم على أية دراية بأنه في غضون خمسين سنة ستضحي ملاحظته منطبقة تماما على الإشعاعات المولدة هنا على الأرض تسبب في وجودها أناس تبعوه [97،96].

منذ حقبة تطوير الرادار، نتج عن قدرات الإنسان في إنتاج و تسخير الميكرويف تكاثر (انتشار) الأجهزة التي تستخدم الميكرويف حيث في يومنا هذا تبدو فرضا قد تأثر بها كل فرد بدرجة معينة. هذا التأثير يطلق عليه بعض الطبيعيون اسم الضباب الالكتروني، حذرت واحدة من الوكالات الحكومية من أن المستويات التي يتعرض لها الأمريكيون كل يوم، من دون أن يكونوا على علم بها، يمكن أن تكون خطيرة.

في بعض المدن على الخصوص تقدر نسبة الميكرويف و الإشعاعات المرتبطة بها بمليار ضعف أو أكثر مما توجد عليه بشكل طبيعي في المحيط. إن منابع هذا النوع من الإشعاعات هي في تزايد سريع.

لدى المطارات أنظمة ملاحه تستعمل الميكرويف، وتشغل رادارات الشرطة بترددات الميكرويف، كما أن كل من إشارات التلفزيون و الهواتف و الكمبيوتر يتم بثها بالميكرويف. المحطات الإذاعية و المراقبة و أنظمة الاتصالات للأقمار الاصطناعية هي الأخرى تستعمل الميكرويف بنفس الطريقة كما تفعل بعض أنظمة مراقبة تلوث الهواء.

عالم الطب يستعملها في التعقيم و تأخير نمو الأورام و معالجة آلام المفاصل. الصناعة و العلوم لدي كل واحدة منها استعمالاتها الخاصة للميكرويف. طور باحثون من كندا طائرة تظل مدة أشهر كاملة في الجو بدون وقود. تشغل الطائرة بالكهرباء التي يتم بثها على شكل حزمة طاقة من الميكرويف ثم تحويلها إلى طاقة كهربائية التي بدورها تشغل المحرك. يعتبر الجيش أكبر مستعمل لأجهزة الميكرويف على الإطلاق في الحرب الالكترونية العالمية في أيامنا هذه، استعمال الميكرويف في مجالات كأنظمة توجيه صواريخ ذات رؤوس نووية و الصواريخ المضادة للصواريخ و أجهزة تحديد مجال الرمي للمدركات و كذلك في أجهزة التصنت.

هذا المجال من تلوث الطاقة أظهر قلقا متزايدا في ما يتعلق بالخطر المحتمل (الكامن) من التعرض إلى مستوى منخفض من إشعاع الميكرويف، بالخصوص الإشعاع القادم من أفران الميكرويف، المستعمل الأكثر شيوعا لطاقة الميكرويف. مع التزايد السريع و المفاجئ لشعبية أفران الميكرويف ، البعض يتساءل بجد عن الحكمة في جلب هذه الأجهزة الباعثة للميكرويف إلى منازلنا و اثر الميكرويف على النسيج البشري لم يفهم

تماما بعد. بدأت أبحاث مكثفة في منتصف السبعينات في الولايات المتحدة على الخصوص و قبل ذلك في الثلاثينيات في روسيا، هي الآن تعكس بعض الاهتمام بنتائج التي توصلت إليها و المثيرة للجدل [98،96].

II-2.5 مدى خطورة الميكرويف

إذا كانت الميكرويف في فرن الموجات قادرة على طهي قطعة من اللحم فإنه سيكون لها نفس التأثير على النسيج البشري إذا تعرض إلى استطاعات عالية و لمدة زمنية كافية. بعض الأعضاء البشرية لديها حساسية خاصة لهذا الأثر الحراري للميكرويف. كما تولد الحرارة بواسطة موقد (جهاز طبخ) ساخن الذي يسبب طبخا سريعا غير متقن و لا طعم له، كذلك تكون الحرارة المولدة بالميكرويف هي المتسببة في خلق مصدر الخطر في هذه الحالة. على سبيل المثال، إذا تعرضت العينان إلى حرارة متزايدة ناتجة عن الميكرويف، فإن نظام دورتها لن يكون قادرا على تموينها تبريدا كافيا. و بالتالي ستطهى كما يطهى بياض البيض. إن التعرض إلى مستويات عالية من الميكرويف يمكن أن يتسبب في إعتام عدسة العين. كذلك، المعدة، الأمعاء، و الأعضاء المرتبطة بها هي الأخرى جد حساسة تجاه الأضرار الحرارية القادمة من المستويات العالية للميكرويف. إن السؤال المطروح هو: ما هي الشدة التي يجب أن تكون عليها مستويات طاقة الميكرويف لخلق هذا النوع من الأضرار؟ [96].

II-3.5 قياس الميكرويف

تحدد كثافة استطاعة الميكرويف بقياس مقدار الطاقة المتدفقة عبر سنتيمتر مربع واحد (إن السنتمتر المربع يقابل حجم حبة أسبرين) من الفضاء في مدة ثانية واحدة. اعتقد العلماء الشرقيين أن أضرار جادة يمكن أن تحصل فقط عند المستويات المقدر بـ $100 \text{ mw} / \text{cm}^2$ أو أكثر. وضعت نظرية مفادها معامل الأمان المقدر بعشر مرات أقل يستطيع أن يكون هامشا مأمونا. و هذا ما دفع بالتالي، في منتصف الخمسينات، إلى اعتماد معيار قياس صناعي اختياري قدر بـ 10 mw/cm^2 .

في سنة 1971 و بسبب قلق دائرة الصحة و التعليم و الإنعاش الأمريكية (المعروفة حاليا بـ دائرة الصحة و الخدمات الإنسانية)، قياس التسرب المسموح به و القادم من أفران الميكرويف في الولايات المتحدة حدد بقانون، أكثر صرامة، ينص على أن المستويات الحالية يجب أن تكون 1 mw/cm^2 (على مسافة 5 cm) (شكل II.10) قبل الامتلاك من قبل المشتري، و بـ 5 mw/cm^2 بعد ذلك. تم تأسيس معايير السلامة هذه على ضوء اعتقاد أن الخطر قادم فقط من التعرض لشدة عالية من طاقة الميكرويف كان عبارة عن أثر حراري أو أثر التسخين المفرط [96].

4.5-II معايير القياس السوفيتية Soviet Standards

في الولايات المتحدة، معايير التعرض تم تطويرها في الدرجة الأولى من طرف معهد القياسات الوطني و فريق أجنبي من العلماء و من ممثلين عن المستخدمين و الصناعيين. بينما في دول أوربا الشرقية و على الخصوص روسيا تم تحديد معايير التعرض من قبل معهد بحث متخصص في الصحة المهنية. عوض التركيز على تأثيرات مستويات الشدة العالية، كان علماء السوفيت يركزون جهودهم على آثار التعرض إلى مستويات الميكرويف المنخفضة بشكل مطول و متكرر. أبحاثهم، التي بدأت قبل تلك التي قام بها الغربيين بفترة معينة، أحدثت تقارير مثيرة زعزت المعتقدات السائدة. أظهرت الدراسات السوفيتية أن التعرض لمدة طويلة إلى مستويات منخفضة من طاقة الميكرويف يمكن أن ينتج عنه آثار غير حميدة لا تنسب إلى الأثر الحراري بمفرده. هذه الآثار يمكن رؤيتها عند مستويات التعرض المساوية لـ 10 mw/cm^2 و حتى الأقل، التي تمثل قياس (معياري) الأمان المهني في الولايات المتحدة.

على ضوء ما سبق قام السوفييت، و الدول الأوروبية، بضبط سياسة صارمة خاصة بهم تجاه الأمان من إشعاع الميكرويف و خلصوا إلى أن معايير الأمان الغربية غير آمنة. على سبيل المثال العمال الروس مطالبين بارتداء قفازات واقية في كل وقت يكونون فيه معرضين مؤقتا إلى مستوى إشعاع ميكرويف 1 mw/cm^2 و هو بمثابة مستوى تسرب روتيني (رتيب) مسموح به من قبل أفران الميكرويف الخاصة بالولايات المتحدة.

أحدثت هذه التقارير ضجة واسعة قادت إلى إعادة النظر في معايير الأمان الغربية ورفع التجريب. منذ ذلك الحين، اكتشفت العديد من المختبرات الأمريكية أن التعرض لمستوى ميكرويف منخفض يسبب آثار مضرّة تجميعية (تراكمية) (*cumulative harmful effects*) على العين كإعتام عدسة العين (تعني كلمة تراكمية أن مستوى منخفض واحد في حد ذاته لن يكون كافيا ليؤثر على صحة الفرد، لكن إذا أضيف مستوى منخفض من استطاعة الميكرويف واحدا تلو الآخر بشكل متكرر عندها يمكن أن تظهر الآثار المضرّة). نشر كذلك باحثون تقارير مفادها أن الميكرويف من شأنها تقليص الكفاءة الفردية و القدرة على انجاز أعمال معينة أيضا و حتى إمكانية ارتباطها بأمراض سرطانية. هكذا، و بينما لم تكتمل كل الأبحاث بعد، فإنه قد ظهرت حقائق كافية تؤيد الاكتشافات السوفيتية التي يحتمل أن تتسبب في مراجعة معايير القياس الأمريكية [96].

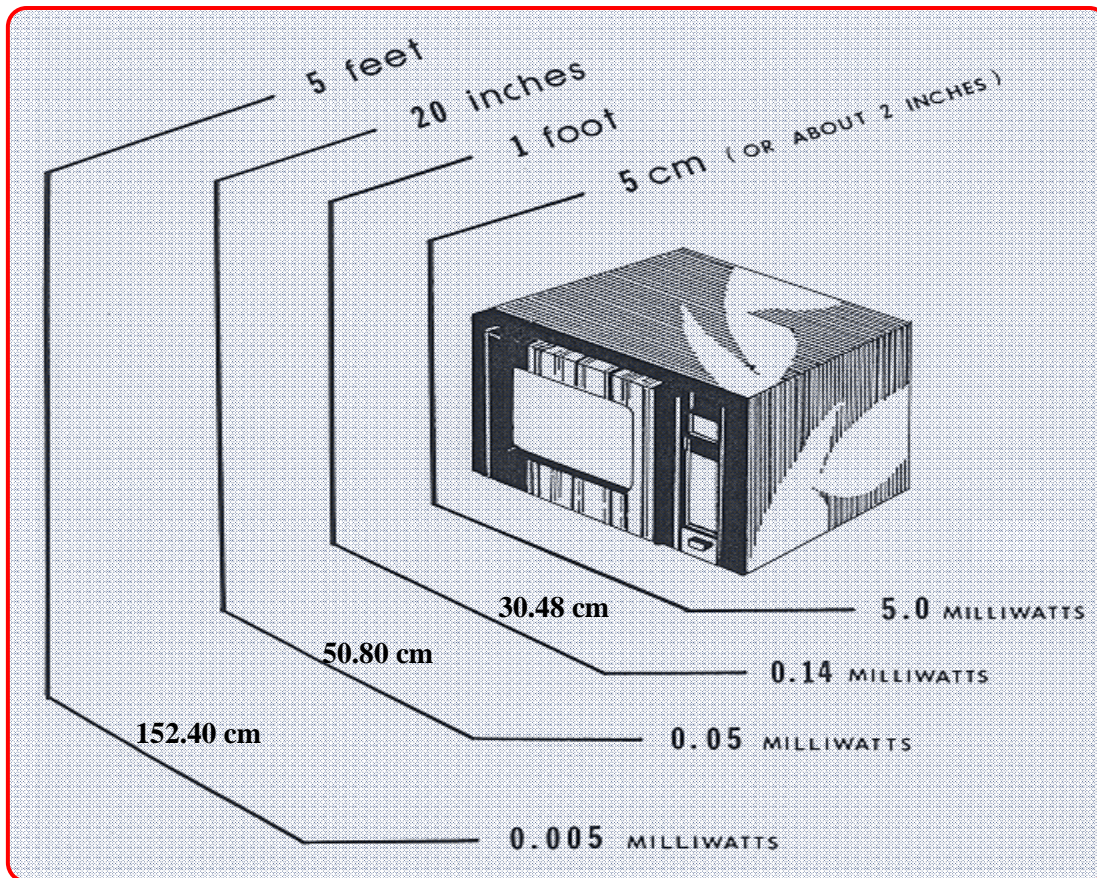
5.5-II مستويات التعرض الآمنة

في الحقيقة لا أحد يعرف بشكل موثوق كيف تفسر النتائج الظاهرة (لأن) الجهود التجريبية لا تزال مستمرة. لكن ثمة أمر يعرفونه جيدا، هو انه يوجد أثر لا حراري للميكرويف عند المستويات التي يمكن أن يتعرض لها الكثير من الناس يوميا. ما هي درجة الخطر التي يمثلها الأثر الاحراري؟ الإجابة على هذا الاختلاف

المتعارض بين أثر بيولوجي بسيط و خطر بيولوجي جاد. على سبيل المثال تقلص القدرة على انجاز أعمال معينة يمكن أن يكون الأثر، لكن إلى أية نقطة يشكل هذا الأثر خطراً؟

إذن ما هي مجالات التعرض الآمنة للميكرويف؟ تحذير قوي للأخطار الغير مرئية متورط في إشعاع لا تأيني، يجيب الدكتور Milton Zaret بروفسور أخصائي في طب العيون، الذي درس لمدة طويلة الآثار البيولوجية للميكرويف : ليست لدي فكرة عن مقدار المستوى الآمن و لا أعتقد أنه يوجد أحدا في العالم يعرف المستوى الآمن كم يقدر.

إن التعرض لمدة طويلة لمستويات ميكرويف منخفضة و دلالتها على صحة البشر ستصير واضحة جلية فقط بعد دراسة شريحة واسعة من الناس اللذين تعرضوا للميكرويف للعديد من السنوات. أنجزت دراسات على الحيوانات، لكنه من الصعب ترجمة آثار الميكرويف على الحيوانات إلى آثار ممكنة على بني البشر. على سبيل المثال، يجد العلماء صعوبة معينة في محاكاة الظروف مع الحيوانات بتلك التي يستعمل فيها الناس أفران الميكرويف. كون أن لا أحد يستطيع القول بوثوق كم يكون مستوى التعرض الآمن للميكرويف فان السلوك الحكيم هو تجنب التعرض إلى إشعاع لا حاجة إليه [96].



شكل 10.11 : مستوى التعرض إلى طاقة الميكرويف المحتمل تسربها بدلالة مسافة الابتعاد عن الفرن [96].

6.5-II البعد الآمن

ما هو البعد الآمن؟ واحدة من الخواص وثيقة الصلة بالميكرويف هي أنها تنتشر و تتبدد بسرعة كبيرة في الجو. مثلا أقصى تسرب مسموح به من فرن الميكرويف (بعد البيع) هو 5 milliwatts من إشعاع الميكرويف في السنتمتر المربع الواحد على بعد يقدر بحوالي 5 cm (2 inches) من سطح الفرن. من ناحية، كما يوضحه الشكل II.10 كلما ابتعدنا عن الفرن فان مستوى التعرض إلى أي طاقة محتملة متسربة تنخفض بشكل كبير جدا. هذا يمكن تشبيهه بإبقاء اليد بسرعة فوق شمعة مشتعلة عل عكس إبقائها على بعد 4، 8 أو 12 inches. قل أنك تقف على بعد 2 inches من فرن الميكرويف و تتعرض إلى إشعاع قدره 5 mw/cm^2 من طاقة الميكرويف، ثم تسير باتجاه الخلف إلى مسافة 20 inches (في حدود ذراع أو 50 cm) فان مستوى تعرضك سينخفض بمعدل 100 مرة، (القياس العياري الحالي السوفيتي يسمح بـ 0.1 mw/cm^2 لمدة لا تزيد عن ساعتين). مع ذلك علماء جاءوا بتقارير تؤكد وجود آثار حتى عند هذه المستويات المنخفضة جدا. هذا، وبضم ما جاء في رأي العلماء الروس بأن آثار الميكرويف تجميعة، يؤكد على ضرورة حاجة المستهلكين (مستعملي أفران الميكرويف) و القائمين على خدمة المستهلكين على حد سواء إلى ملاحظة و اتخاذ احتياطات معينة عامة و واعية، يمكن إيجازها في ما يلي:

- 1- البقاء على بعد ذراع على الأقل من فرن شغال. خاصة بالنسبة للمرأة الحامل تبعا للوكالة الحكومية للولايات المتحدة، التي تقرر أن الجنين البشرى يحتمل أن يكون الشريحة الأكثر حساسية من السكان المعرضة لإشعاع الميكرويف بشكل كبير. كما يمثل الأطفال شريحة حساسة أخرى من السكان. لا يجب على أي أحد و خاصة الأطفال الوقوف و التحديق مباشرة باتجاه داخل فرن ميكرويف شغال (عامل).
 - 2- إذا كان باب الفرن لا ينغلق كما ينبغي، بسبب التوائه أو اعوجاجه أو وجود عائق يحول دون غلقه في كل الأحوال لا تشغل الفرن إلا إذا كنت مختصا مؤهلا وبيدك جهاز تردد راديوي RF لائق.
 - 3- لا يجب أبدا تشغيل الفرن و هو فارغ (بدون حمل). هذا يخلق حالة لا حمل التي يمكن أن تعطل الفرن و تتسبب في زيادة تسرب الميكرويف.
 - 4- لا يجب أبدا توقيف أو تعديل نظام الغلق الداخلي للأمان الخاص بالفرن إلا إذا كنت مجهزا بالأدوات المناسبة و كنت مؤهلا للقيام بذلك. إن العبث بأزرار الحماية لفرن الميكرويف هو بمثابة جنون يمكن تشبيهه بمحاولة نزع فرامل السيارة.
- إن إدارة الغذاء و الدواء الأمريكية تنصح بعدم استعمال أفران الميكرويف في التعليب داخل المنازل. لأنه يعتقد أن الميكرويف لا تولد حرارة عالية بكفاية قادرة على قتل البكتيريا الضارة.
- إن ملاحظة اقتراحات الأمان هذه ستساعد على تخفيض مستويات التعرض للميكرويف إلى أدنى حد و تقليل خطر الحوادث [96،99].

7.5-II كلمة أخيرة

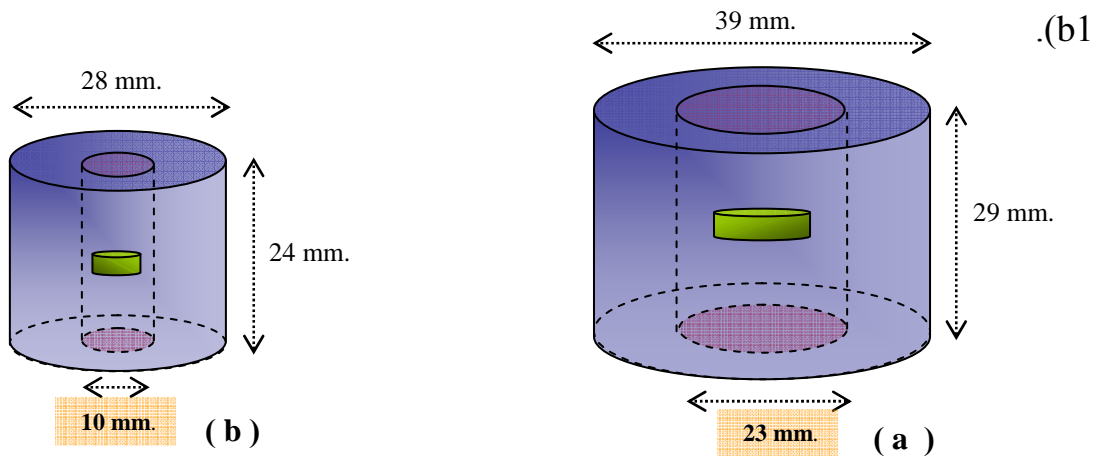
كما هو الحال مع العديد من وسائل الراحة الحديثة يجب أن توزن الفوائد ضد المخاطر. في بعض الأحيان البحث عن التوازن بين المخاطر و الفوائد يمكن أن يكون أمرا دقيقا و فيه خلاف. لهذا و أثناء استعمال هذه الأجهزة، بالمخاطر التي يتحمل مسؤوليتها المستعمل وحده، فإن تطبيق إرشادات و نصائح الاستعمال العامة سيقصص بالتأكد من معامل الخطر في التوازن المذكور. إن نمو المعارف و المفاهيم المتعلقة بالإشعاع الكهرومغناطيسي سيفضي إلى آفاق مستقبلية أفضل تمكن من وضع تعريف واضح لماهية هذا التوازن في كل حالة و السماح لكل فرد برسم خلاصته بالضبط عن محاسن و مخاطر استعمال أفران الميكرويف [96].

تطوير منظومة التسخين بالميكرويف

3
الفصل

III-1 عنصر التسخين بالميكرويف

في الأفران التقليدية، يولد عنصر التسخين الحرارة بتحويل الطاقة الكهربائية السارية فيه إلى طاقة حرارية بفعل جول كنتيجة لتصادمات الإلكترونات بذرات الشبكة البلورية لمادة عنصر التسخين. أما في عنصر التسخين بموجات الميكرو (ع.ت.م.م) فطاقة الحقل الكهرومغناطيسي لهذه الموجات هي التي تسبب تصادمات الجزيئات بعضها ببعض مولدة بذلك حرارة ناتجة عن ظاهرة فقدان العازلية للمادة (تأخر مسابرة الجزيئات لحقل الميكرويف). فالعنصر الأول يغذيه تيار كهربائي و الثاني تغذيه موجة كهرومغناطيسية، لهذا السبب أطلق اسم عنصر التسخين بموجات الميكرو (ع.ت.م.م) لمشابهته بعنصر التسخين الكهربائي. تجدر الإشارة إلى انه تم اعتماد تسمية أخرى لموجات الميكرو وهي المصطلح الموجود في المراجع الأجنبية > ميكرويف< الذي ابقى عليه كما هو. عنصر التسخين بالموجات الميكروية يعمل بالتردد 2.45 GHz مخصص للمعالجة الحرارية للمواد. عنصر التسخين هذا عبارة عن قطعة خزفية مجوفة ذات شكل أسطواني، مصنوع أساسا من مادة كربايد السيلكون (SiC)، قادر على امتصاص طاقة الحقل الكهرومغناطيسي للموجات الميكروية و تحويلها إلى طاقة حرارية في مجال درجات الحرارة العالية (1700°C-1000°C). لم تسمح عناصر التسخين القديمة [104] و العاملة بموجات الـ MW إلا بتليد عينات صغيرة الحجم لا يتجاوز قطرها 7 mm وهذا كان راجعا لقطر تجويف عنصر التسخين الذي كان في حدود 10 mm (شكل III).



شكل III.1: شكل يوضح أبعاد عنصري التسخين القديم و الجديد (SiC+kaolin) مع العينات داخل تجويف كل منهما.

لهذا السبب تم إدخال تحسينات على عناصر التسخين القديمة اشتملت أساسا على توسيع القطر الخارجي و الداخلي وبالتالي توسع حجمها ككل. أصبحت عناصر التسخين الجديدة قادرة على المعالجة الحرارية لعينات ذات قطر 13 mm عند درجات حرارية عالية (شكل III.a1) و (شكل III.2).



شكل III.2: صورة فوتوغرافية لعنصر التسخين المحسن (يمين) و مقارنة بينه و بين عنصر التسخين القديم (يسار).

III-2.1 عنصر تسخين بمادة الـ SiC فقط :

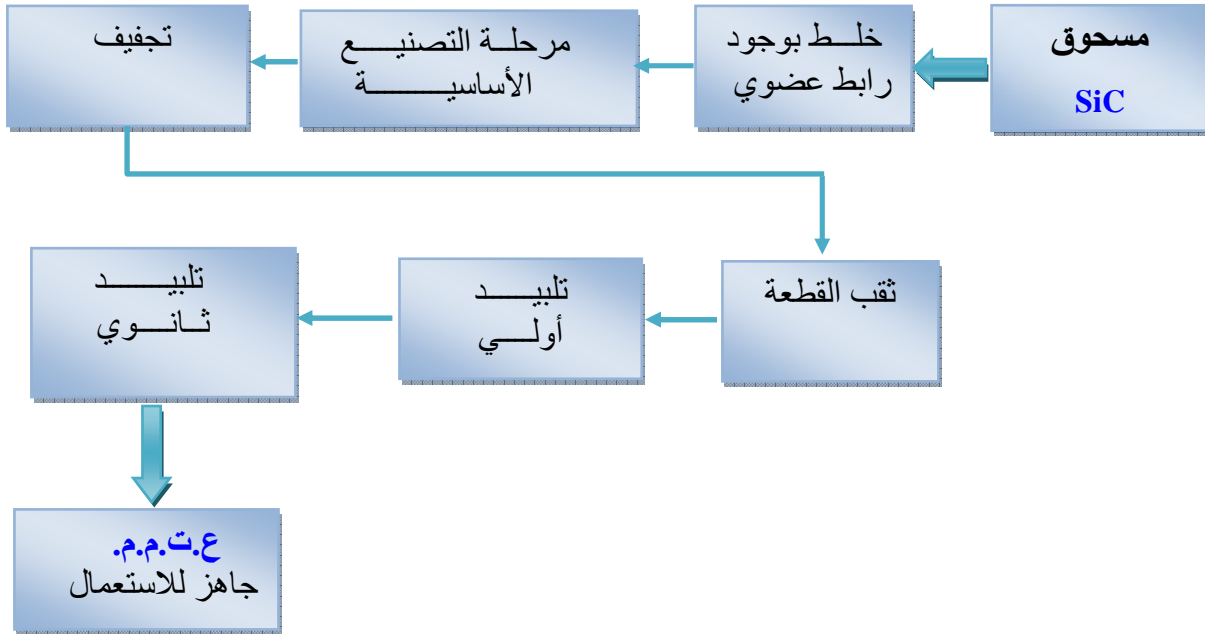
تم التحقق تجريبيا من إمكانية تليد قطعة كاملة من كربايد السيلكون الصناعي (α -SiC) في فرن كلاسيكي بإضافة رابط عضوي بالتدرج من درجة حرارة الغرفة (20°C) إلى الدرجة 1100°C بسرعة تسخين $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ مدة 4 إلى 5 ساعات. متبوع بمعالجة حرارية عند 1400°C مدة 1 (واحد) ساعة. هذه العملية تعتبر غير يسيرة بالنظر إلى صعوبة تليد مادة الـ SiC في الأفران التقليدية. يبين الشكل III.3 أهم مراحل تصنيع عنصر التسخين.

يتميز عنصر التسخين المصنوع من مادة الـ SiC فقط بسرعة تسخين فائقة و قدرته على بلوغ درجات حرارة عالية لم يسبق أن بلغها أيا من العناصر المضاف إليها مواد خزفية أخرى و نخص بالذكر سيليكات الألمنيوم. إذ بلغ 1650°C في مدة 4 دقائق و نصف. أقصى درجة حرارة تم تسجيلها كانت في حدود

1750°C حتى ذوبان رأس المزدوج الحراري (pt+pt10%Rh).

يذكر أن عنصر التسخين من الـ SiC فقط يشمل على عيوب عملية إذا ما راعينا الهدف الأساسي من صناعته و هو تليد المواد الخزفية على اختلاف أنواعها. فكلما تم عزله حراريا بشكل جيد كلما زادت سرعة تسخينه. و كما هو معلوم أن المواد الخزفية تتأثر تأثرا كبيرا بالتدرجات الحرارية فهي ما تلبث، وهي عند درجة

حرارة الغرفة، أن يتعرض سطحها الخارجي إلى تدفق حراري عال قادم من تجويف ع.ت.م.م تصل درجته إلى $200-400^{\circ}\text{C}$ في ثوان معدودة مما يتسبب في تصدع المادة الخزفية المعالجة.



الشكل 3.III : مخطط يبين المراحل الأساسية في صناعة عنصر التسخين بموجات الميكرو.

3.1-III كربايد السيلكون (SiC) :

يحصل على الـ SiC بتفاعل الغرافيت (C) مع السيلكون (Si) في حدود 2000°C ، يعتبر كربايد السيلكون الذي يدعى عادة كذلك (Carborundum) مركب مستعصي الذوبان متميز بصلادته و ناقلية حرارية العاليتين و سلوكه الكهربائي كنصف ناقل.

1.3.1-III الخواص الفيزيائية

تقدر نقطة ذوبانه في غياب الأكسجين في حدود 2700°C و استعماله في الجو المحيط محدود بدرجات حرارة لا تتجاوز 1500°C ، لأنه فوق هذه الدرجة تصبح أكسدة هذا المركب سريعة و مصحوبة بتشكيل أكسيد السيلكون (SiO_2) و غاز الكربون؛ مع ذلك، يمكن أن يضمن توضع طبقة من أكسيد السيلكون حماية جزئية للمركب، بحيث يجب الإبقاء على درجة حرارة كافية لجعل الـ SiO_2 في الحالة الزجاجية وهذا ما يتطلب بلوغ نقطة ذوبانه، أي 1710°C .

صلادته محصورة بين 9 و 10 في سلم Mohs.

تطبيقات كربايد السيلكون :

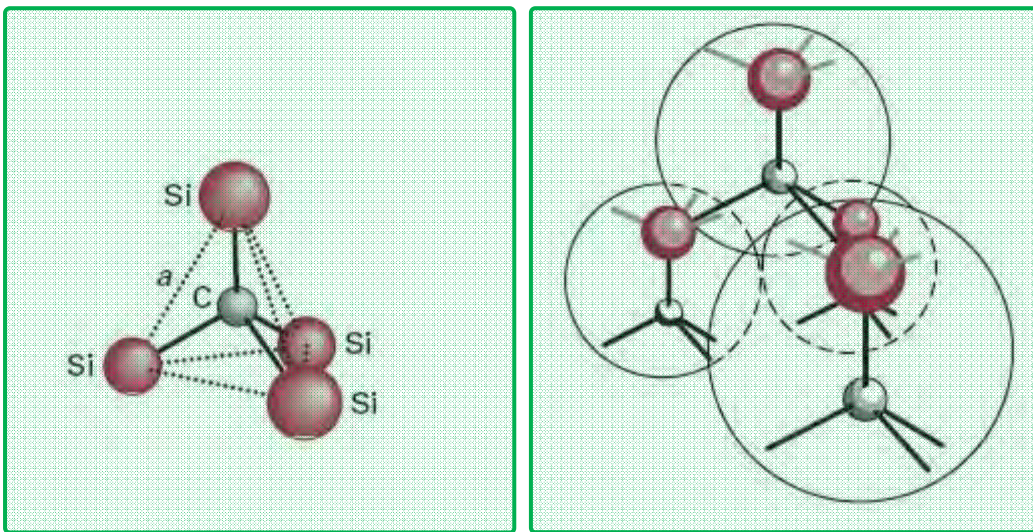
يستعمل الـ SiC في المواد الكاشطة في العديد من المجالات، تعتبر كلفته أقل ارتفاعاً من كلفة عجينة الماس. و عندما يكون على شكل مساحيق مختلفة النعومة فإنه يفيد في كشط سطوح المواد التي يتم مشاهدة أنسجتها بالمجهر الضوئي.

يستعمل كذلك كبراييد السيلكون كمادة حرارية عالية؛ من اجل هذا يتم خلطه بروابط خزفية التي تضمن حمايته من التأكسد. إن الناقلية الحرارية المتميزة لـ SiC تفسر استعماله في بعض عناصر التسخين الخاصة بالأفران الكهربائية التقليدية. إلا أن استعمال الـ SiC يمكن أن ينجر عنه تشكل جو إرجاعي بسبب أكسيد الكربون الناتج عن تأكسد المركب.

يملك كبراييد السيلكون، من وجهة نظر كهربائية، مقاومة تنخفض بزيادة درجة الحرارة. حيث تنخفض من 0.5 إلى 0.1Ω.cm عندما تتغير درجة الحرارة من 0°C إلى 1000°C [100].

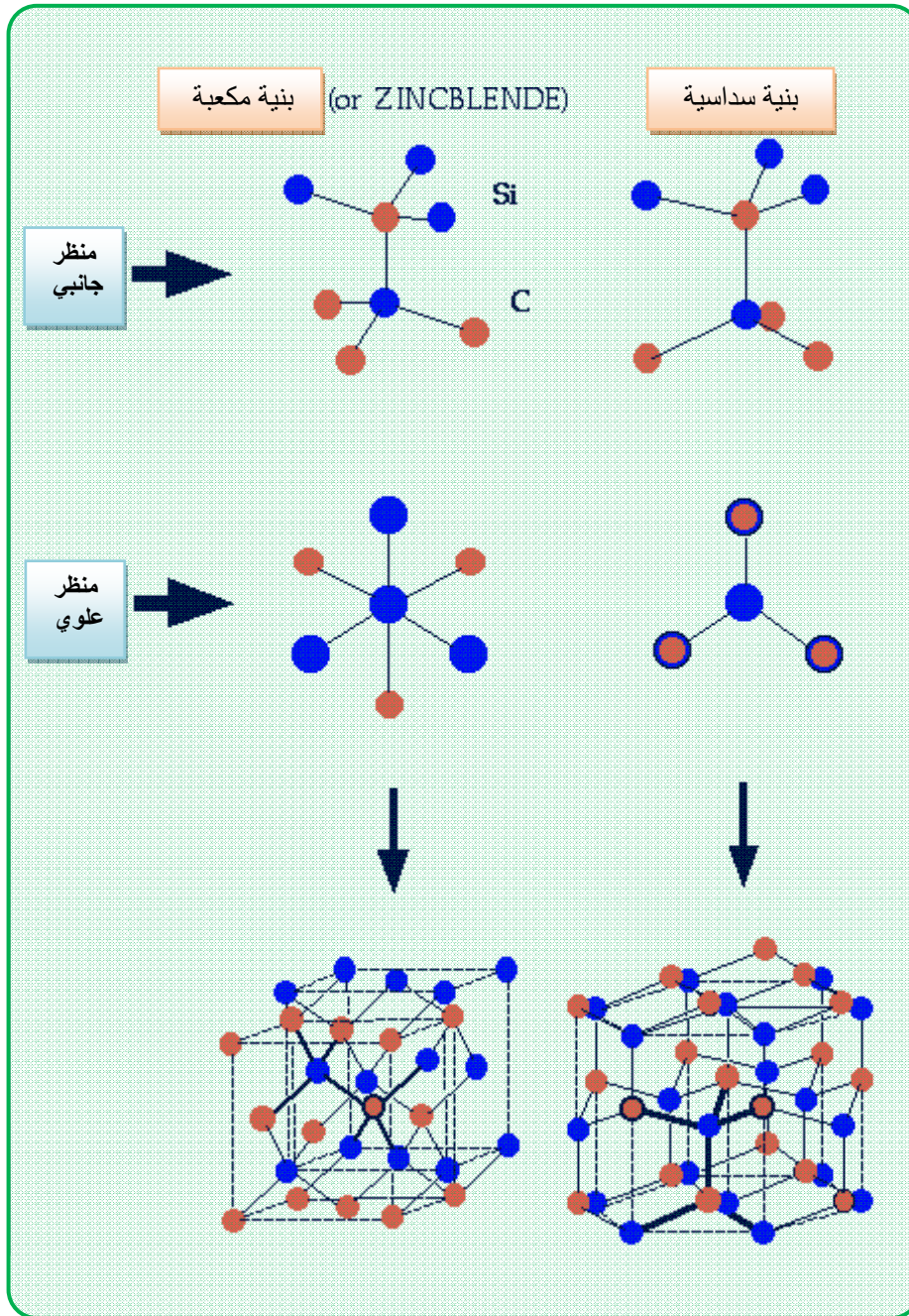
2.3.1-III البنية البلورية لكربايد السيلكون

لا يتواجد الـ SiC على شكل بلورة بسيطة بل يوجد على شكل عائلات (politypes) من البلورات. لا تختلف هذه البلورات في عدد ذرات Si و C و لكن تختلف في ترتيب و توزيع الطبقات الذرية. فمثلاً، الترميز 6H-SiC يعني أن البلورة ذات شكل سداسي و تملك 6 طبقات ذرية من الـ SiC و ذلك قبل أن تتكرر الخلية الأولية. يوجد أكثر من 200 بلورة من الـ SiC تشكل عائلات هذا المركب. بالإضافة إلى إن الخواص الفيزيائية تتعلق بالبنية البلورية. في العائلات المكعبة يملك الـ SiC بنية مشابهة لبنية الماس حيث تكون طول الرابطة Si - C مساوية إلى 1.9 Å. يظهر الشكل 4.III تمثيلاً لهذه الرابطة كما يمكن معرفة عدد ذرات السيلكون التي يمكن أن تتحد مع ذرة كربون واحدة [101].



شكل 4.III : التمثيل الكروي المبسط للرابطة Si-C على اليمين و التوزيع tetrahedric بين ذرة كربون و أربعة ذرات سيلكون على اليسار [101].

البنيتان البلوريتان المعروفتان لمركب كربايد السيلكون كما يظهرهما الشكل 5.III هما : البنية المكعبة و البنية السداسية.



شكل 5.III : منظر جانبي و علوي للبنيتان البلوريتان المشهورتان لمركب كربايد السيلكون (SiC) ، الكرات الزرقاء تمثل ذرات السيلكون (Si) و الكرات الحمراء تمثل ذرات الكربون (C) [102].

- يشار إلى أن العائلات الأكثر أهمية هي كما يلي [103]:
- $3C$ -SiC أو α -SiC ذات بنية مكعبة ممركرة الوجوه بثلاث طبقات.
 - $4H$ -SiC أو β -SiC ذات بنية سداسية باربع طبقات.
 - $6H$ -SiC ذات ستة طبقات.

2-III نظام العزل الحراري

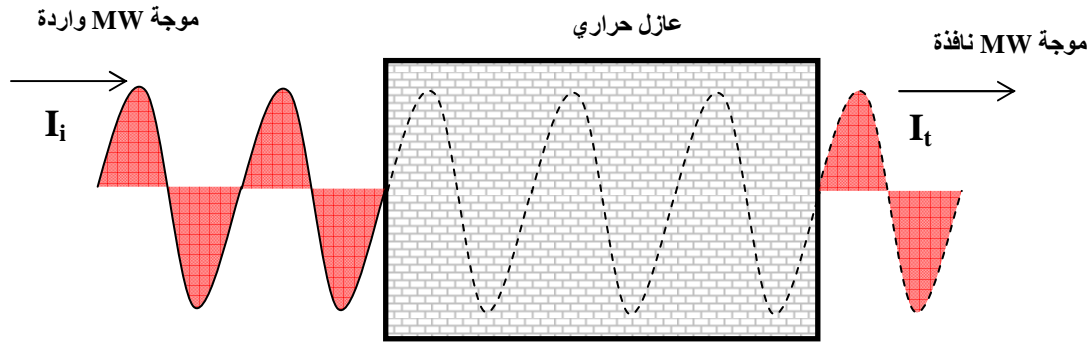
1.2-III أهمية نظام العزل الحراري

I- لماذا نظاما للعزل الحراري (ن.ع.ح)؟

يتسبب انتشار الحرارة التي يولدها عنصر التسخين، داخل المطبق لفرن موجات الميكرو (MW) في عدم تجانس التسخين على مستوى جسم ع.ت.م. كما أن استمرار ارتفاع الحرارة و عدم وجود حاجز يمنع انتشارها يلحق أضراراً بالغة للأجزاء المكونة للفرن لاسيما المغنطرون و لوحة التحكم الالكترونية. و من هنا تأتي أهمية تصميم نظام بعزل الحرارة داخل حيز ع.ت.م. فقط عن الوسط الخارجي.

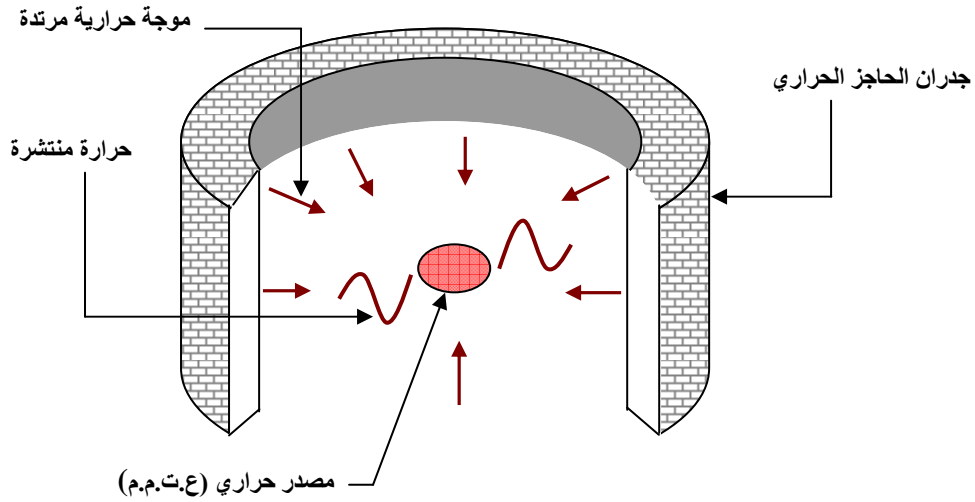
2.2-III المميزات الأساسية لنظام العزل الحراري

يجب على ن.ع.ح في أية معالجة حرارية للمواد بموجات الـ MW أن يلعب دوران أساسيان في آن واحد :
- أن يكون شفافاً لموجات الـ MW بمعنى أن يخترقه الحقل الكهرومغناطيسي دون أن تتغير شدته (الشدة النافذة تكون مساوية تقريباً للشدة الواردة $I_i = I_t$) كما يوضحه الشكل III.6.



شكل III.6 : مبدأ شفافية العازل الحراري تجاه موجات الميكرو (MW) .

- أن لا يسمح بضياع الحرارة الناشئة داخله إلى الوسط الخارجي. فمادة العازل الحراري تملك معامل فقدان عازلية ضعيف و ناقلية حرارية ضعيفة أيضا (شكل III.7).



شكل 7.III : مقطع لعازل حراري أسطواني الشكل يظهر ارتداد الحرارة على جدرانه الداخلية والقادمة من مصدر حراري في المركز.

يشار انه تم تصميم ن.ع.ح أولي قديم مصنوع من الكاولان - في موضوع عمل سابق [104] - مكون من أنبوب أسطواني الشكل و أرضية و غطاء قرصي الشكل، إلا أنه كان يشتمل على عيوب و هو ما دفعنا إلى استبداله بنظام عزل حراري جديد تم تطويره و تحسينه.

3.2-III عيوب العازل الحراري القديم

إن احتواء نظام العزل الحراري القديم المصنوع من الكاولان على نسبة من الشوائب يخفض بشكل محسوس من شفافية العازل الحراري لموجات MW ، لان مواد كـ Fe_2O_3 تمتص موجات الـ MW و بالتالي تقلل من شدة الحقل الكهرومغناطيسي لموجات الـ MW النافذة إلى عنصر التسخين و التي بدورها يحولها إلى حرارة أقل.

كما أن نظام العزل الحراري القديم أبدى آثارا واضحة لذوبانه أو تشوّهه عند درجات حرارة عالية نسبيا < $1400^{\circ}C$ وهي درجة الحرارة التي تتحملها مادة الكاولان.

4.2-III العازل الحراري الجديد

صنع نظام العزل الحراري الجديد من الـ Al_2O_3 اللبني النقي لأنه يعتبر من أفضل المواد الشفافة لموجات الـ MW حيث أن عمق قشرته من رتبة المتر [105] كما أن ناقليته الحرارية ضعيفة إلى جانب قدرته على تحمل درجة حرارة عالية تصل إلى $1800^{\circ}C$ (يذوب في حدود $2000^{\circ}C$) و بالتالي فهو لا يذوب عند مستوى الأرضية الملامسة لعنصر التسخين كما كان الحال في ن.ع.ح القديم.

III-5.2 أقسام العازل الحراري

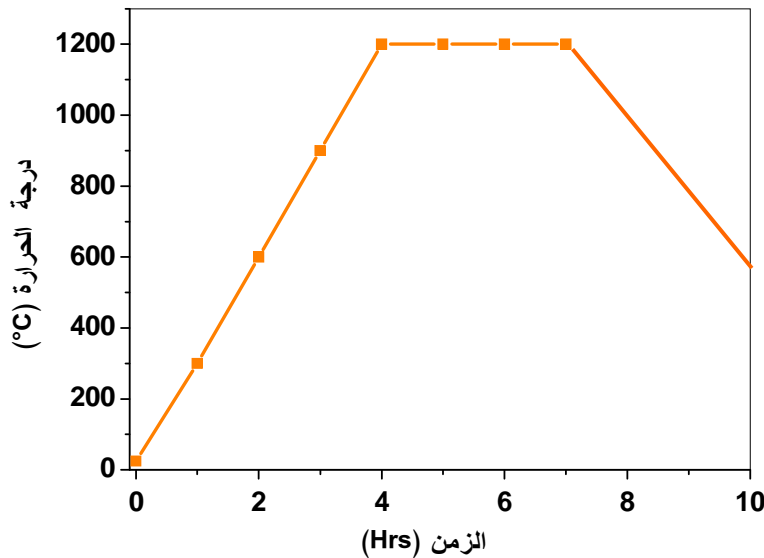
يتكون العازل الحراري المصنوع من الألومينا المسامي من قسمين رئيسيين يشكلان و هما مجتمعان بطانة مزدوجة يتمركز فيها عنصر التسخين، الأولى داخلية و الأخرى خارجية. البطانة الداخلية عبارة عن أنبوب مسدود من الأعلى أما البطانة الخارجية عبارة عن قطعة ذات شكل متوازي المستطيلات ذو قاعدة مربعة تحوي على تجويف أسطواني الشكل في مركزه يسمح بولوج البطانة الداخلية. يوجد بين البطانتين فراغ سمكه حوالي 1 mm.

III-6.2 مراحل تصميم العازل الحراري

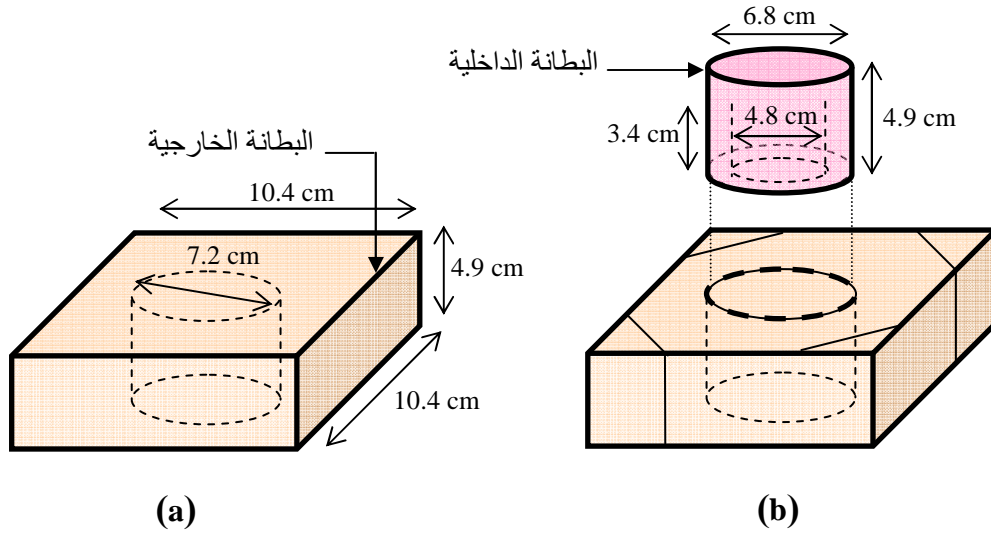
تمر مرحلة تصميم العازل الحراري بمرحلتين أساسيتين الأولى مرحلة القص و الثقب و الثانية مرحلة المعالجة الحرارية

1- القص و الثقب: تم قص قطعة من الألومينا المسامي على شكل متوازي المستطيلات ذات طول و عرض 10.5 cm و ارتفاعها 5 cm من القطعة الكبيرة الأصلية (100 cm×50 cm×5 cm) بالاستعانة بمنشار حديدي و مسطرة ملي مترية. بعدها تم قطع أسطوانة من الألومينا ذات قطر 6.8 cm من مركز قطعة متوازي المستطيلات. هذه الأسطوانة تم ثقبها من الأسفل بثقب فطره 4.8 cm، و ترك الجزء العلوي مسدودا بحوالي 1.5 cm من مادة الألومينا (شكل III-9-10).

2- المعالجة الحرارية: أخضع العازل الحراري بقسميه إلى معالجة حرارية (شكل III-8) بغية إزالة الرابط العضوي (binder) من جهة و جعل القطع الخزفية المكونة لأقسام العازل الحراري أكثر تماسكا بتليدها جزئيا من جهة أخرى. تمت المعالجة عند الدرجة 1200°C مدة 3 ساعات بسرعة تسخين تقدر بحوالي 5°C/min.



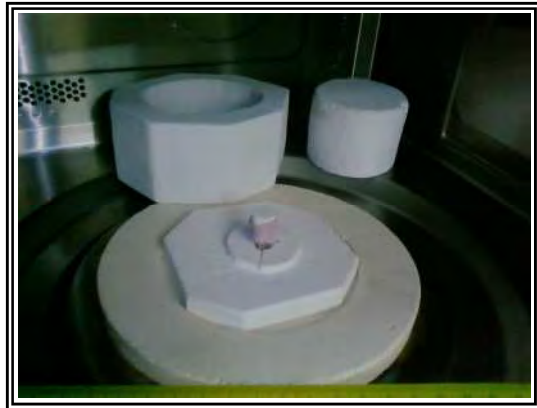
شكل III-8 : الدورة الحرارية التي أخضعت لها أقسام العازل الحراري.



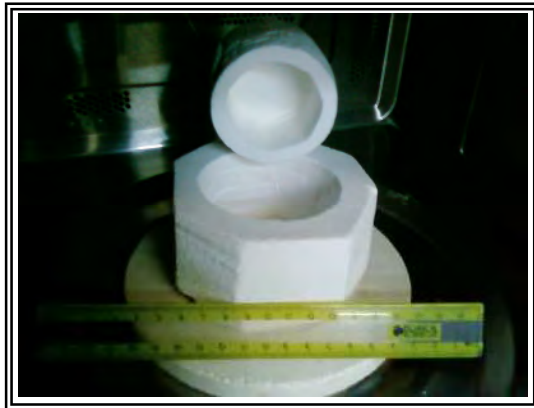
شكل 9.III : شكل توضيحي يختصر مرحلة القطع ، القص و الثقب لقسمي العازل الحراري
(a):القص؛ (b): القطع والثقب



(a)



(b)



(c)

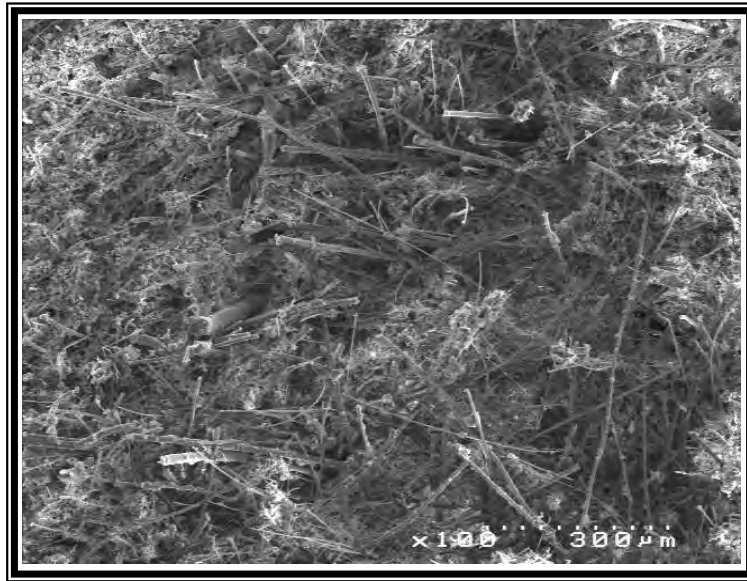


(d)

شكل 10.III : صور فوتوغرافية لأقسام العازل الحراري المطور مزدوج البطانة. (a) و (b) :
الأقسام منفصلة، (c) و (d) الأقسام و هي موصولة ببعضها ببعض.

III-7.2 التدرجات الحرارية العكسية

في الحقيقة، غالبا ما يكون للخزفيات المعالجة بموجات الميكرو تدرجات حرارية عكسية (مقلوبة) ناتجة عن فقدان الحرارة بالإشعاع و الحمل من سطح الخزفية إلى الحجره غير المسخنة. لتفادي التدرجات الحرارية العكسية الشديدة، غالبا ما يعزل سطح الخزفية عن الحجره غير المسخنة. إن الخزفيات حساسة بالخصوص للتدرجات الحرارية لأن، التوترات الحرارية يمكن أن تكون عالية بكفاية مما يتسبب في بداية ظهور تصدعات في الخزفيات الهشة. لتفادي هذه التصدعات و التقليل قدر الإمكان من التدرجات الحرارية العكسية تم تصميم نظام العزل المذكور ببطانة مزدوجة من الألومينا الليفي (شكل III.11).



شكل III.11 : صورة بالمجهر الإلكتروني الماسح تظهر البنية المجهرية لمادة الألومينا الليفي التي استعملت في تصميم العازل الحراري.

III-3 نظام التبريد

III-3.1 أهمية نظام التبريد في المعالجة بالميكرويف

I- لماذا نظاما للتبريد؟

فرن الـ MW يحوي على نظام تبريد داخلي إذن لماذا نحتاج إلى نظام تبريد إضافي؟
إن فرن الميكرويف (MW) مزود بحماية عبارة عن أقفال حرارية (bilames) تقوم بفتح الدارة الكهربائية الكلية للمغنترون (وبالتالي توقيف إشتغاله) في الحالتين التاليتين:

- الحالة الأولى: عند بلوغ حجرة التسخين درجة حرارة حرجة
- الحالة الثانية: عند بلوغ المغنترون في حد ذاته درجة حرارة حرجة تؤثر على مردود إشتغاله أو حتى إمكانية إتلافه و هي الحالة الغالبة في هذه الدراسة.

من المعلوم أن درجة حرارة منظومة التسخين (عنصر التسخين- ع ت + نظام العزل الحراري- ن ع ح) تكون عالية جدا تصل أو تفوق 1500°C مقارنة بالحرارة اللازمة لطهي الطعام، كون أن الفرن المستعمل هو فرن MW منزلي، و التي تكون في حدود 250°C إلى 300°C . و لهذا لا بد من نظام تبريد خارجي يحول دون الغلق الآلي للدارة الكهربائية لفرن الـ MW. فنظام التبريد ضروري بمكان عند الرغبة في تمديد مدة المعالجة الحرارية لعينات الدراسة و كذلك لتجنب إحداث أضرار بالفرن من الحرارة المفرطة التي تتعرض لها مختلف أجزائه في حالة عمل منظومة التسخين.

- ما هو نظام التبريد؟
- كيف يشتغل؟
- أين وكيف يتم تركيبه؟
- لماذا يختار جهة تدفق هواء التبريد دون الأخرى؟

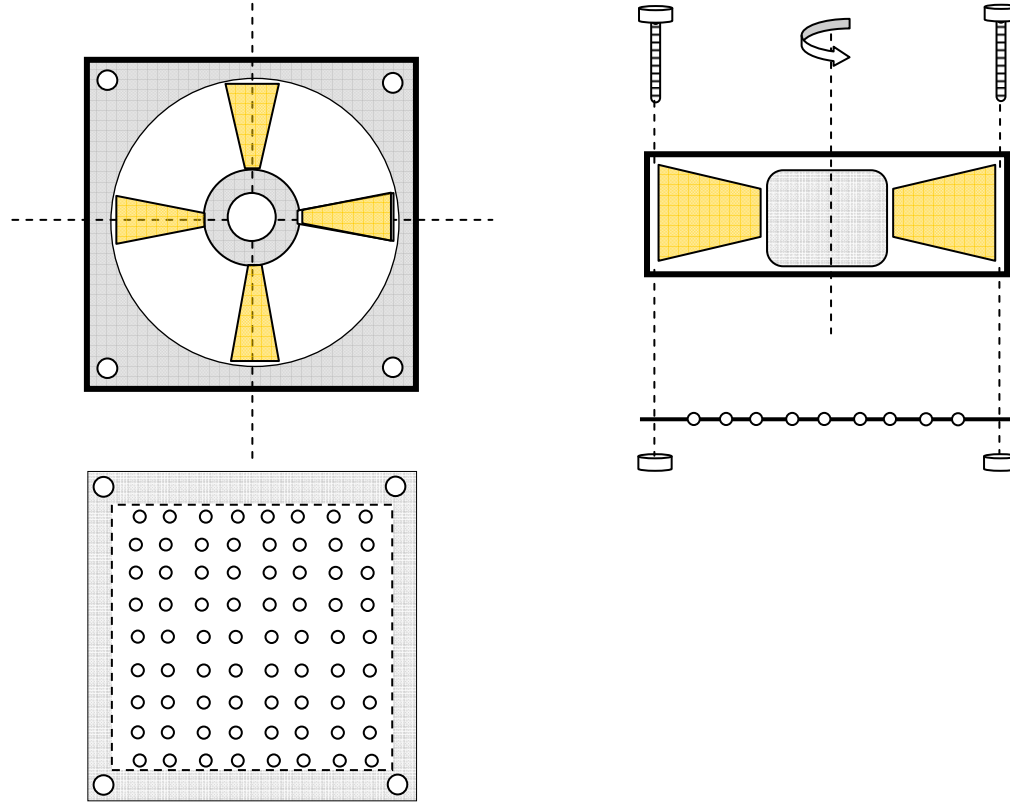
III-3.2 عمل نظام التبريد

نظام التبريد عبارة عن مروحة كهربائية تطبق تيارا هوائيا (by forced convection) متدفقا على الجزء الساخن من جهاز الـ MW فيحصل تبادل ترموديناميكي بين الهواء و الجزء الساخن. جزيئات الهواء الباردة تضغط باستمرار على سطح الجزء الساخن و بامتصاص حرارته تنخفض تدريجيا مبتعدة بذلك عن درجة الحرارة الحرجة التي تتسبب في قطع الكهرباء عن فرن الـ MW.

III-3.3 طريقة تركيب نظام التبريد

يجب أن يركب جهاز التبريد فوق المغنترون تماما و ذلك بعد إحداث شبكة من الثقوب على غطاء الفرن تسمح بمرور هواء التبريد. كل ثقب من ثقوب الشبكة يجب أن لا يتجاوز قطره 3 mm أي عشر ربع موجة الـ MW ($\lambda=12\text{ cm.}$) لمنع تسرب هذه الأخيرة إلى المحيط الخارجي. كما يجب الانتباه إلى اختيار جهة

تدفع هواء مروحة التبريد من الوسط الخارجي نحو الأجزاء الساخنة لأن مردود التبريد في هذا الاتجاه يكون عالياً.



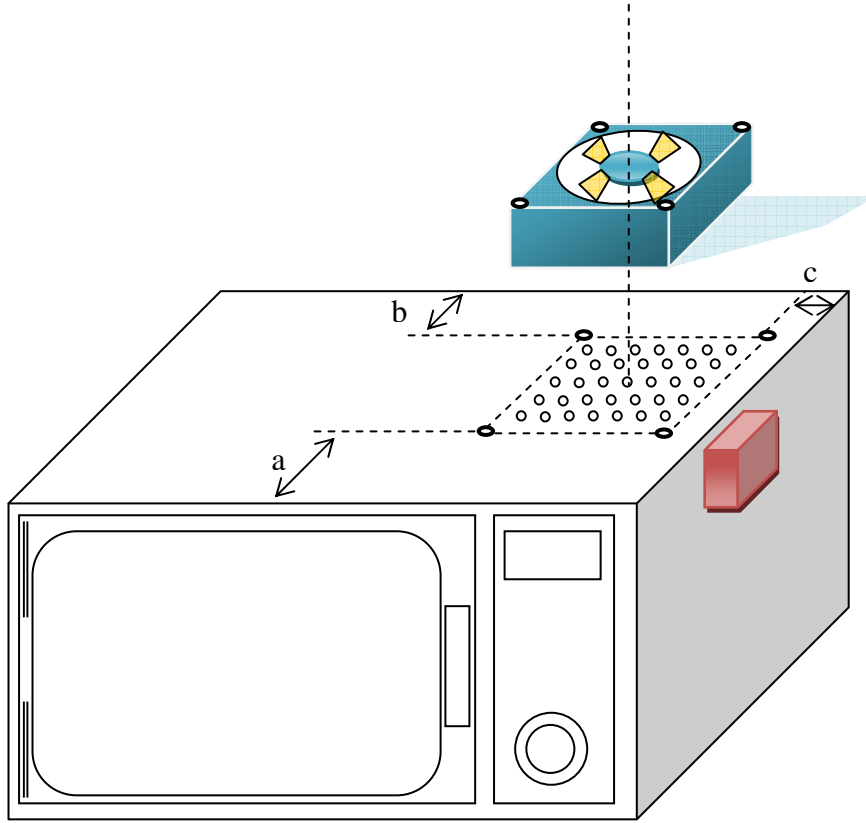
شكل 12.III: منظر أفقي لجهاز التبريد و شبكة الثقوب على اليمين. المنظر العلوي مبين على جهة اليسار.

شبكة الثقوب (شكل 12.III) تكون فوق الجزء الساخن تماماً للمغنترون و هو الجزء الذي يشمل على حجرات الرنين. يتم اختيار قطر مروحة التبريد بناء على مساحة الجزء الساخن للمغنترون. تساعد وضعية القفل الحراري، الموضوعه فوق المغنترون، على تحديد هذا الجزء الساخن.

تثبت مروحة التبريد الكهربائية على الغطاء الخارجي لفرن الـ MW باستعمال أربعة براغي-صامولة بحيث تغطي تماماً شبكة الثقوب (شكل 13.III).

يتم وصل كابل التغذية الكهربائية لنظام التبريد (شكل 14.III) بنقاط لحام أسلاك التغذية لجهاز التبريد الداخلي و الذي يستعمل نفس التوتر (220 V). سمحت هذه التوصيلة باشتغال نظام التبريد الإضافي مباشرة بتشغيل فرن الـ MW و يتوقف بتوقفه.

مساحة شبكة الثقوب و البعد المتوسط بين ثقبين متواليين يقدر بحوالي $12 \times 12 \text{ cm}^2$ و 1 cm على الترتيب كما يقدر قطر كل ثقب بحوالي 3 mm.



شكل 13.III : وضعية تركيب جهاز التبريد على الهيكل العلوي لفرن الميكرويف. يمكن ملاحظة مؤخرة المغنطرون (القطعة الحمراء) الملامسة للهيكل الجانبي للفرن. الأبعاد a و b و c المحددة لموضع شبكة الثقوب هي على التوالي 16 cm و 8 cm و 0.5 cm .

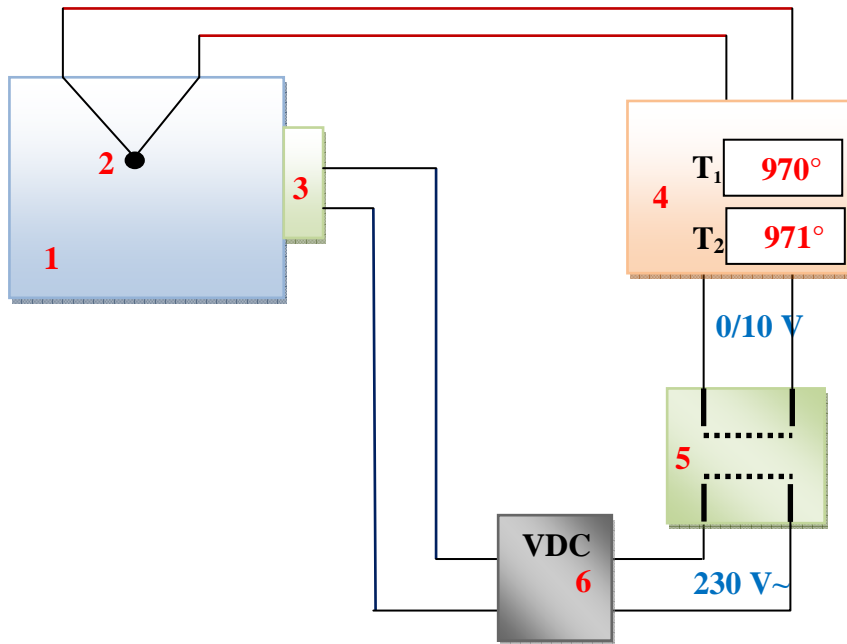


شكل 14.III : صورة فوتوغرافية لجهاز التبريد بعد تركيبه على الهيكل العلوي لفرن الميكرويف. يمكن ملاحظة شبكة الثقوب بين عنفات المروحة على اليمين وبراغي التثبيت على اليسار.

III-4 نظام التحكم في درجة الحرارة

صمم فرن موجات الميكرويف المنزلي لينتج حرارة لا تتجاوز درجتها $250^{\circ}\text{C}/300^{\circ}\text{C}$ ، التي تعتبر كافية لطهي كافة أنواع الأطعمة، كما أن نظام تحكمه في درجة الحرارة يخص هذا المجال فقط فلا يمكن استعماله في المجالات الحرارية العالية ($1000^{\circ}\text{C}-1650^{\circ}\text{C}$) التي تعمل فيها منظومات التسخين التي عنيت بها هذه الدراسة. من أجل هذا تم تزويد فرن الميكرويف بنظام خارجي للتحكم في درجة الحرارة. يشرح الشكل III.15 كيفية التحكم في عملية التسخين بصورة عامة. صمم نظام التحكم وركب في المختبر و يتكون من الأقسام الأساسية التالية :

- لاقط للحرارة (مزدوج حراري)
- حامل المزدوج الحراري
- جهاز ضبط /مبرمج الكتروني لدرجة الحرارة
- موصل ستاتيكي (ساكن) و دائرة قاسم التوتر



شكل III.15 : مخطط يوضح مبدأ عمل نظام التحكم في درجة الحرارة عن طريق التحكم في دائرة القدرة (الاستطاعة) لفرن الميكرويف بواسطة موصل ساكن. (1) فرن الموجات، (2) مزدوج حراري، (3) دائرة تغذية المغنطرون، (4) ضابط/مبرمج درجة الحرارة، (5) موصل ساكن، (6) دائرة قاسم التوتر VDC ، T_1 و T_2 درجتى الحرارة المسرحة و المقاسة على الترتيب.

III-4.1 جهاز ضبط / برمجة درجة الحرارة الالكتروني

يعتبر جهاز ضبط - برمجة درجة الحرارة الالكتروني (ج.ض.ب.د) (شكل III.16) مهم جدا لقيادة الأفران الكهربائية بدقة و توفير أوقات المتابعة الطويلة أمام هذه الأخيرة.

يتكون جهاز التسخين لفرن كهربائي كلاسيكي عامة من مقاومات (عناصر تسخين) موصولة بتغذية كهربائية. يكمن دور جهاز الضبط - البرمجة الحرارية (شكل III.16) في التحكم في هذه التغذية الكهربائية بالتصرف في زر تماس القدرة (الاستطاعة) وذلك للسماح للفرن بالمتابعة الآلية لنمط تسخين تم برمجته

مسبقاً. فهو الذي يسمح بمرور التيار الكهربائي في المقاومات (دائرة المغنطرون في هذه الدراسة) من أجل تتبع، بدقة كبيرة، منحنى التسخين الذي تم برمجته. من أجل هذا يجب عليه مراقبة درجة حرارة الفرن بواسطة لاقط حراري (مزدوج حراري). بناءاً على ذلك فإن لهذا الجهاز (شكل III.16) دورين هما [106]:

- إجراء (تنفيذ) برنامج التسخين المقرر تبعاً لمعطيات الزمن ودرجة الحرارة.

- التحكم في تسخين الفرن لمتابعة البرنامج خطوة بخطوة. من أجل هذا يقوم بقياس درجة الحرارة و مقارنتها بتلك الموجودة في البرنامج و التصرف في زر تماس القدرة وفق حاجة التسخين.

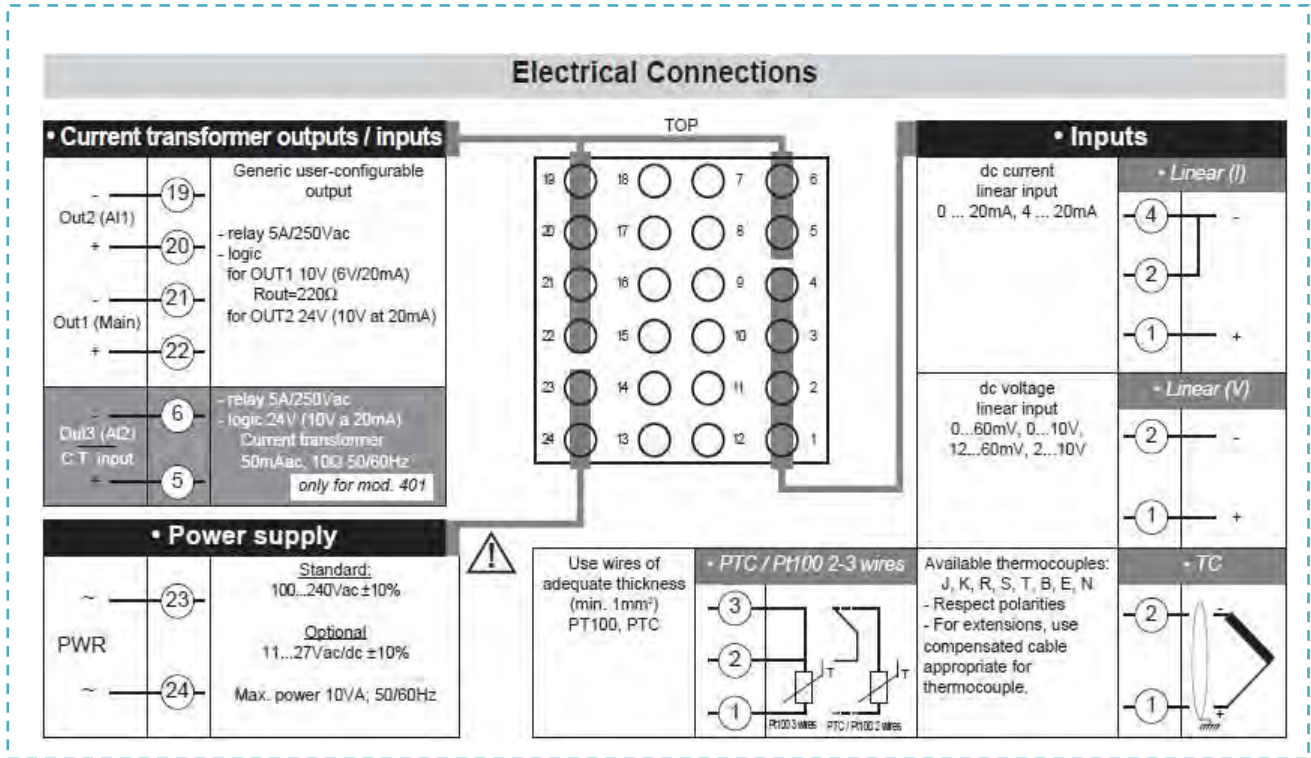
III-1.1.4 قسم البرمجة: يقوم ببرمجة منحنى التسخين المرغوب من أجل أن يتم متابعته من قبل الفرن بشكل آلي. يسمح المبرمج بوظائف عدة منها؛ إطلاق التسخين عند زمن محدد و مختار، تخزين معطيات البرنامج في الذاكرة للسماح باستعمالها لاحقاً عند الحاجة، توقيف التسخين آلياً، تكرار تنفيذ برنامج أو عدة برامج متسلسلة. يقوم المبرمج بتنفيذ معطيات درجة الحرارة التابعة لمنحنى التسخين خطوة بخطوة. بعدها يقوم بتحويلها إلى قسم الضبط حيث تقارن بالقيم المقاسة من مدخل المزدوج الحراري الذي يؤثر على موصل القدرة (زر التماس) من أجل تعديل التسخين (شكل III.15).

III-2.1.4 قسم ضبط درجة الحرارة: يعتبر هذا القسم بمثابة مركز التحكم للفرن. فهو يقيس درجة حرارة الفرن من مدخل المزدوج الحراري ثم يقارنها بالقيمة المعطاة من المبرمج بعدها يؤثر على التسخين بإرسال إشارة خروج للموصل. و يسمح كذلك باستغلال مخرج الإنذار في حالة حصول خطأ ما أو تجاوز القيمة المصرح بها في البرنامج.

إشارة الدخول: في الحالة التي تهمنا يجب أقلمة جهاز ضبط الحرارة بإدخال معطيات تخص نوع المزدوج الحراري الذي يتم وصله بالمدخل (شكل III.17). يمكن أن يكون المزدوج الحراري من النوع K, J, T, N, E, R, S, B أو C، النوع المستعمل في هذه الدراسة هو S (Platinum/Platinum-rhodium) من أجل $T^{\circ}\text{C max } 1760^{\circ}\text{C}$.

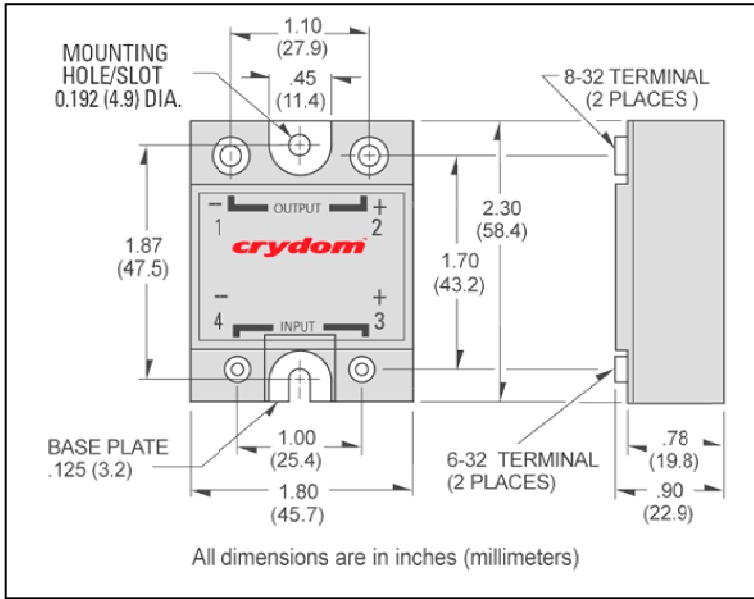


شكل III. 16 : جهاز ضبط/برمجة درجة الحرارة من النوع GEFRAN 600 و 401 [107].

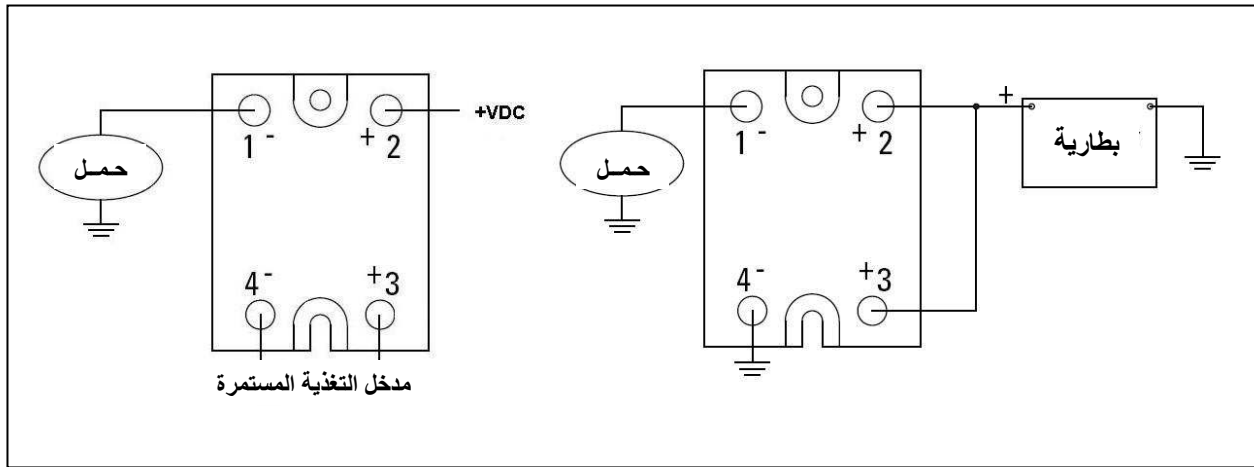


شكل III. 17 : التوصيلات الكهربائية لجهاز ضبط / برمجة درجة الحرارة. (1) و (2) مدخل المزدوج الحراري، (23) و (24) تغذية الجهاز، (21) و (22) مخرج أساسي نحو الموصل الساكن [107].

- 1- مخرج موصل يتحكم في تغذية زر تماس القدرة. إن مخرج الموصل المدمج بجهاز ضبط الحرارة لا يتحمل إلا تيارات ضعيفة من رتبة 2 إلى 3 أمبير، إلا أن هذا التيار يسمح بتشغيل أغلبية موصلات القدرة التي تستطيع تبديل تيارات عالية من رتبة 10 إلى 80 أمبيراً.
- 2- مخرج ذو توتر مستمر 0-10 V أو مخرج SSR (Solid Stat Relay) وظيفته التحكم في موصل ساكن (شكل III.18) و هو الذي تم استعماله في هذه الدراسة. يبين الشكل III.19 قطبية الـ SSR (موصل ساكن) و كيفية استعمال ووصلات الدخول و الخروج [106، 108].



شكل 18.III: صورة الموصل الساكن (زر التماس الساكن) من نوع crydom على اليمين و مختلف أبعاده حسب الصانع [108] على اليسار (القيم بين قوسين معطاة بالمليمتر).



شكل 19. III: طريقة ربط الموصل الساكن من نوع crydom بالدارة الكهربائية حسب الصانع [108]: 1⁻ و 2⁺ مخرج إلى دارة الاستطاعة، 3⁺ و 4⁻ مدخل الإشارة المربعة المستمرة 0/10 V.

III-2.4 حامل المزدوج الحراري

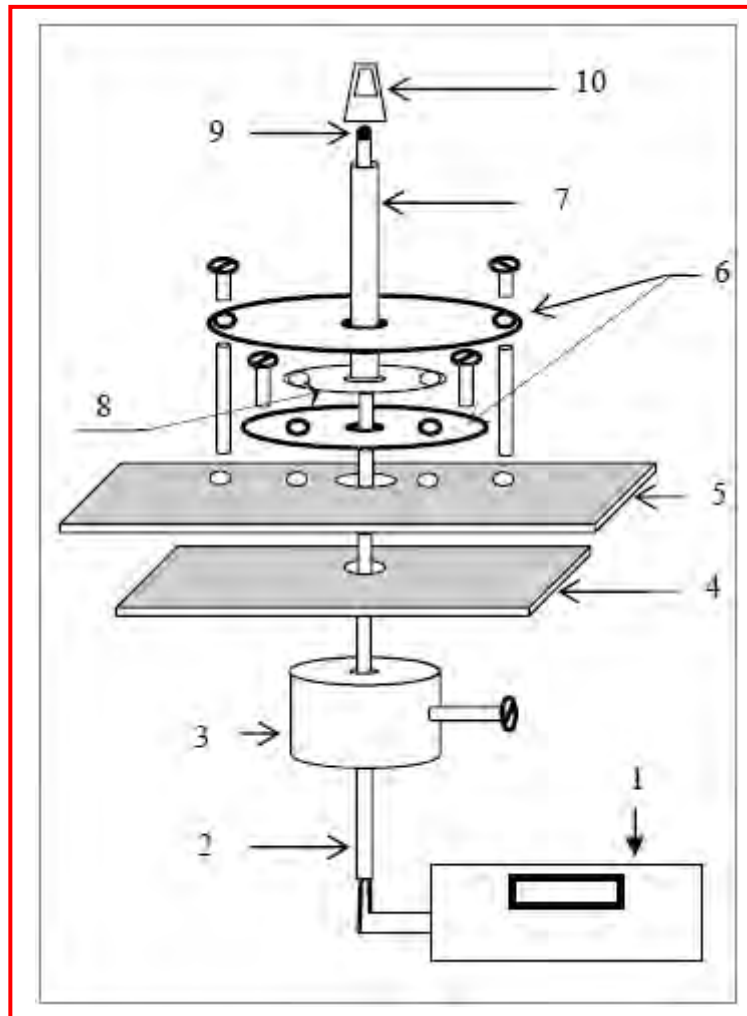
تكمّن أهمية دور حامل المزدوج الحراري في تثبيت هذا الأخير في مركز حجرة التسخين بشكل عمودي تماما و عند الارتفاع المطلوب بالضبط و هذا سيسمح بقراءة درجة الحرارة على نحو صحيح. تم تصميم حامل للمزدوج الحراري في المختبر و الذي يتكون من الأجزاء الأساسية الثلاثة التالية :

- قرصان معدنيان من الفولاذ

- أنبوب من البلاتين مفلطح من القاعدة

- أداة تعديل و تثبيت الارتفاع

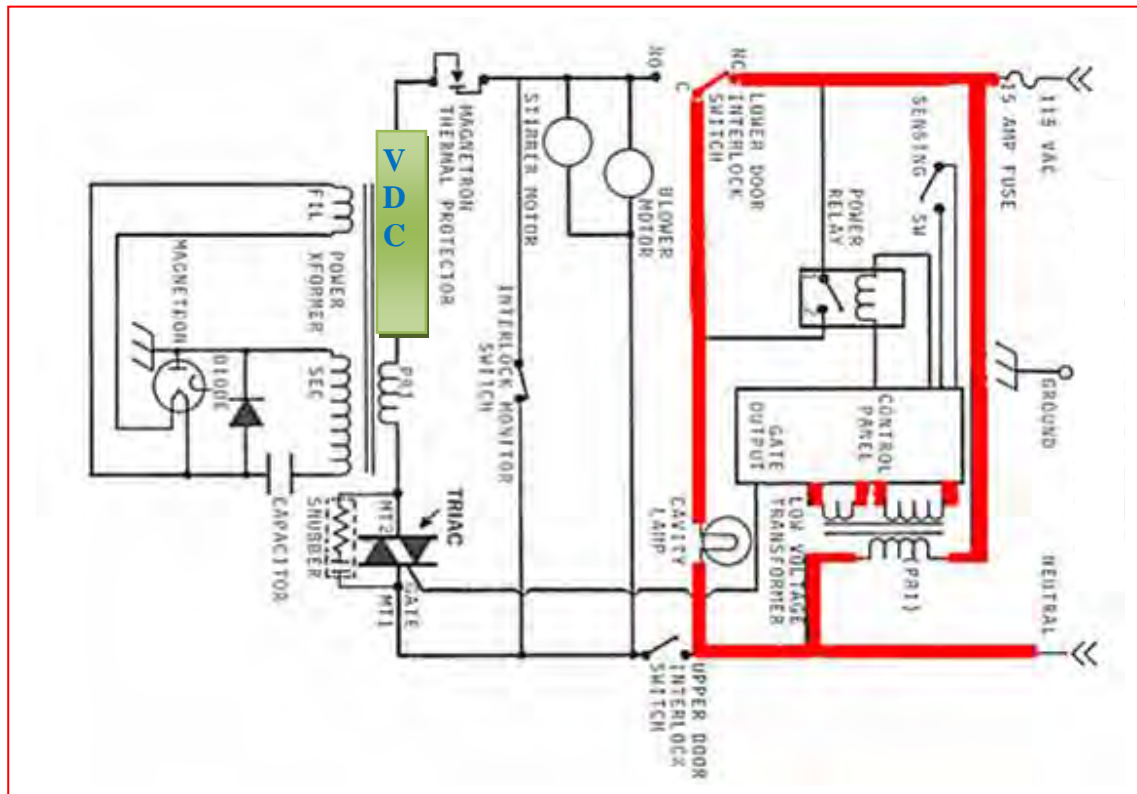
حسب الشكل III.20 ، يجب أن ينطبق القرصان الفولاذيان على القاعدة المفلطحة لأنبوب البلاتين بإحكام بواسطة براغي. كما تم التحكم في ارتفاع المزدوج الحراري بأداة ضبط الارتفاع اسطوانية الشكل مصنوعة من البلاستيك و التي تحتوي على قناة في مركزها تسمح بمرور المزدوج الحراري عبرها. كذلك تم تزويد رأس المزدوج الحراري بغطاءين مختلفين لحمايته من التفاعل مع حقل الميكرويف، أما النهايتين الحررتين للمزدوج الحراري تم توصيلهما بجهاز ضبط/برمجة درجة الحرارة (المدخل (1) و (2) في الشكل III.19) [109].



شكل III. 20 : مكونات المزدوج الحراري و طريقة توصيله بجهاز التحكم في فرن الميكرويف. (1) جهاز ضبط/برمجة درجة الحرارة، (2) الطرف السفلي للمزدوج الحراري، (3) أداة ضبط الارتفاع، (4) الجدار الخارجي لحجرة الفرن، (5) الجدار الداخلي، (6) قرصي تثبيت فولاذيين، (7) أنبوب بلاتيني، (8) قاعدة الأنبوب البلاتيني، (9) رأس المزدوج الحراري، (10) غطاء مزدوج من الألومينا و البلاتين [109].

III-3.4 دائرة قاسم التوتر VDC

تجدر الإشارة إلى أنه تم إضافة دائرة قاسمة للتوتر على التسلسل مع الملف الابتدائي PRI للمحولة عالية التوتر المغذية للمغنترون. جنبت هذه العملية تعرض فرن الموجات لصددمات عنيفة نسبيا في كل مرة يسري فيها التيار ذو التوتر العالي (5K V!) في الملف الثانوي SEC (شكل III.21). يوجد الملف الابتدائي بين المكونين: الـ TRIAC و قاطعة الحماية للمغنترون في مخطط الشكل 21. كانت دائرة قاسم التوتر تحتوي أساسا على ملفين و مكثفة كيميائية على التفرع . يقوم نظام التحكم في درجة الحرارة، المذكور و المشروح سابقا، بربط قاسم التوتر بالملف الابتدائي PRI أو قطعه حسب المعطيات التي تمت برمجتها.



شكل III.21 : مخطط لنظام التشغيل في أحد أنواع أفران الميكرويف [110]. تمت إضافة دائرة قاسمة للتوتر VDC على التسلسل مع الملف الابتدائي PRI الموجود بين الـ Triac و زر حماية المغنترون.

خلاصة

في هذا الفصل تم تقديم شروح تخص مبدأ عمل نظام التحكم في درجة الحرارة وضرورة تزويد منظومة التسخين بالميكرويف بهذا النظام كما تم شرح كل أقسامه بشيء من التفصيل إضافة إلى إرفاق بطاقات تقنية و صور لأهم مكوناته جاءت مدعمة لهذه الشروح وذلك حسب الشركة الصانعة لكل مكون.

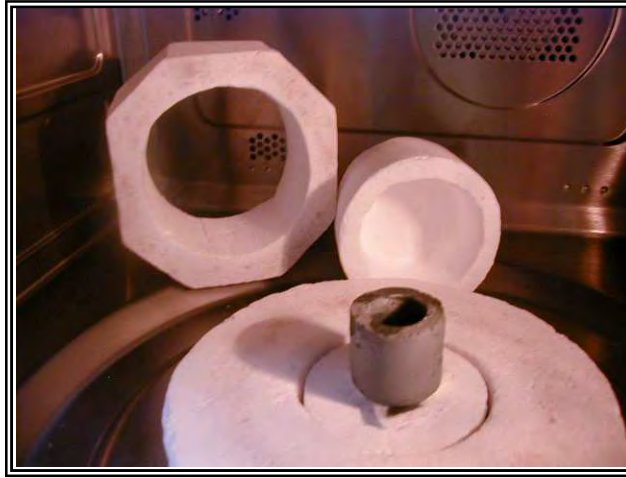
دراسات تجريبية على التسخين بالميكرويف

4
الفصل

1. دراسة تسخين مادة الـ SiC بدون إضافات باستعمال موجات الميكرويف.

1.1-IV تأثير حجم حبيبات الـ SiC على التسخين بالميكرويف

صنعت عينات أسطوانية الشكل من مادة كربايد السيلكون (SiC) الصناعي بدون أية إضافة باستعمال نوعين من الحبيبات؛ حبيبات ذات حجم كبير و أخرى ذات حجم صغير. وضعت العينات في مركز منظومة التسخين داخل حجرة الفرن (مطبق الموجات) كما يبينه الشكل 1.IV. أستعمل العازل الحراري المطور ذو التشكيلة المزدوجة، قطره D_1 ، لعزل الحرارة المولدة من العينات بعد تفاعلها مع موجات الميكرويف.

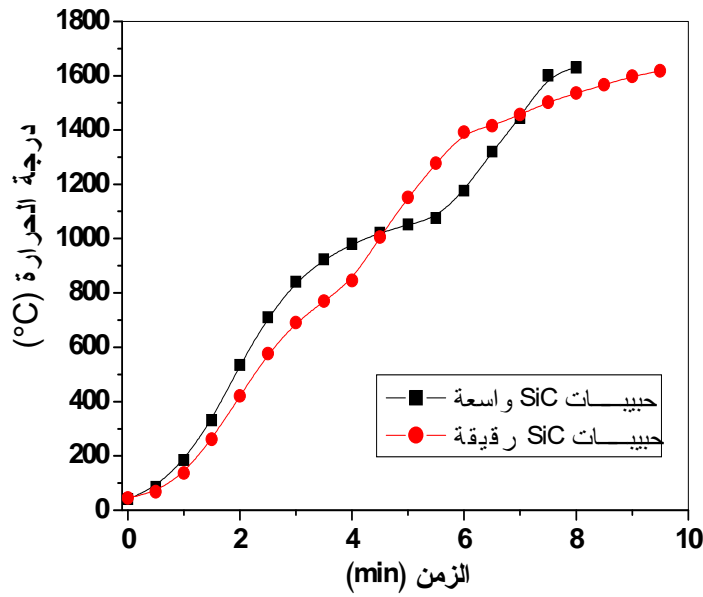


شكل 1.IV: ع.ت.م.م مصنوع من كربايد السيلكون (SiC) ذو الحبيبات الرقيقة تم اختباره في نظام العزل الحراري المطور.

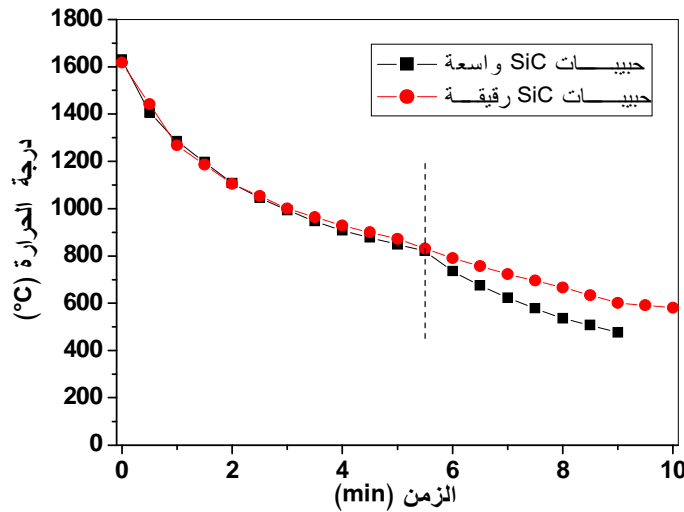
بعدها تم تسليط موجات الميكرويف على المنظومة بالاستطاعة القصوى (100%) المقدرة بـ 850 W. تم قياس درجات الحرارة كل 30 s لمدة زمنية تتراوح بين 8 min و 10 min. بعد بلوغ المنظومة درجة الحرارة القصوى في حدود 1650°C يتم برمجة الفرن بالاستطاعة 20 % من الاستطاعة القصوى لتبريد المنظومة مدة

5 min بعدها أضيفت دورة تبريد في هواء الغرفة لمدة 5 min أخرى. منحنيات التسخين و التبريد المميزة معطاة في الشكلين 2.IV و 3.IV.

يمكن ملاحظة أن سرعة تسخين الـ SiC ذو الحبيبات الكبيرة تم بشكل أسرع منه في الحبيبات الصغيرة (V_L) و هذا قبل نهاية الدقيقة الخامسة من زمن المعالجة حيث بلغت السرعة المتوسطة القصوى للتسخين لكل نوع من الحبيبات عند الدقيقة الثالثة القيم $V_L=266.3^\circ\text{C}/\text{min}$ و $V_F=215.0^\circ\text{C}/\text{min}$ على الترتيب. بعد الدقيقة الخامسة تنقلب الظاهرة و يصبح العكس هو الصحيح حيث يصير تسخين الـ SiC ذو الحبيبات الصغيرة هو الأسرع ($V_L < V_F$) و هذا قبل الدقيقة السابعة حيث سجلت السرعات المتوسطة القصوى $V_F=224.5^\circ\text{C}/\text{min}$ و $V_L=189.2^\circ\text{C}/\text{min}$ على الترتيب ، ليعود من جديد تسخن الحبيبات الكبيرة هو الأسرع.



شكل 2.IV : مقارنة بين مادة الـ SiC ذات الحبيبات الكبيرة و الرقيقة أثناء مرحلة التسخين.



شكل 3.IV: مقارنة بين مادة الـ SiC ذات الحبيبات الكبيرة و الرقيقة أثناء مرحلة التبريد.

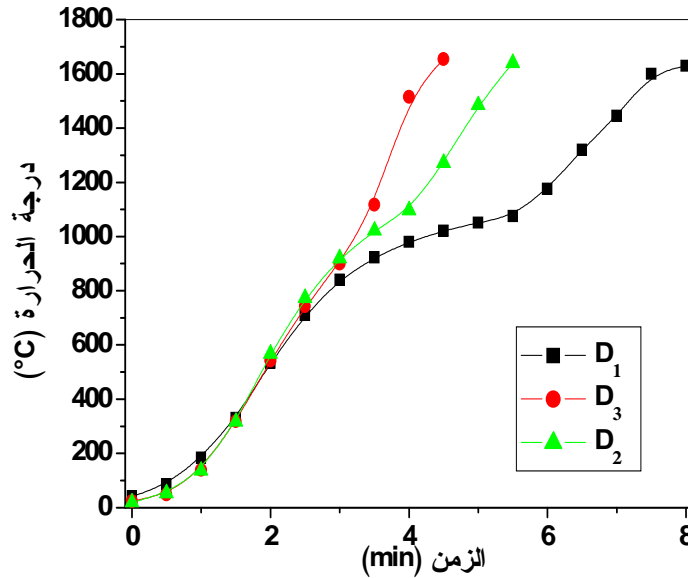
في ما يتعلق بمنحنى التبريد المميز المبين في الشكل 3.IV فان المنحنيين الموافقين لنوعي المادتين يكاد ينطبق الواحد على الآخر في المرحلة الأولى من التبريد التي تم فيها تطبيق 20 % من استطاعة الميكرويف لمدة 5 min. يصبح الأمر مختلفا عند مرحلة التبريد الثانية التي تمت في جو الغرفة . فبعد الدقيقة الخامسة ينفصل المنحنيين الواحد عن الآخر ويشير ذلك إلى أن نوعي كربايد السيلكون صارا يبردان بسرعتين مختلفتين. فعينة الـ SiC المصنوعة من الحبيبات الصغيرة تظهر تبريدا أبطأ من تلك المصنوعة من الحبيبات الكبيرة. المادة التي بدأت تسخن بسرعة هي نفسها التي بردت بسرعة. يتغير قانون درجة حرارة التسخين من تغير أسي إلى تغير لوغاريتمي بشكل دوري في المجال الزمني من 0 min إلى 10 min ومما يلاحظ أن حبيبات الـ SiC الصغيرة تبدي تأخرا في هذا التناوب مقارنة بالحبيبات الكبيرة.

2.1-IV تأثير قطر العازل الحراري على تسخين الـ SiC

لدراسة تأثير حجم العازل الحراري على تسخين العينات الاسطوانية (عناصر التسخين) المصنوعة من مسحوق كربايد السيلكون بنوعيه الرقيق و الخشن تم تصميم ثلاثة أنواع من العوازل الحرارية مزدوجة البطانة من مادة الالومينا الليفي بأقطار مختلفة ومتزايدة D_1 و D_2 و D_3 على الترتيب $(D_1 > D_2 > D_3)$.

استعملت في دورة التسخين الاستطاعة القصوى وقيست درجات الحرارة كل 30 s أما في دورة التبريد استعملت 20 % من الاستطاعة متبوعة بالتبريد في جو الغرفة. نتائج التسخين معطاة في الشكلين

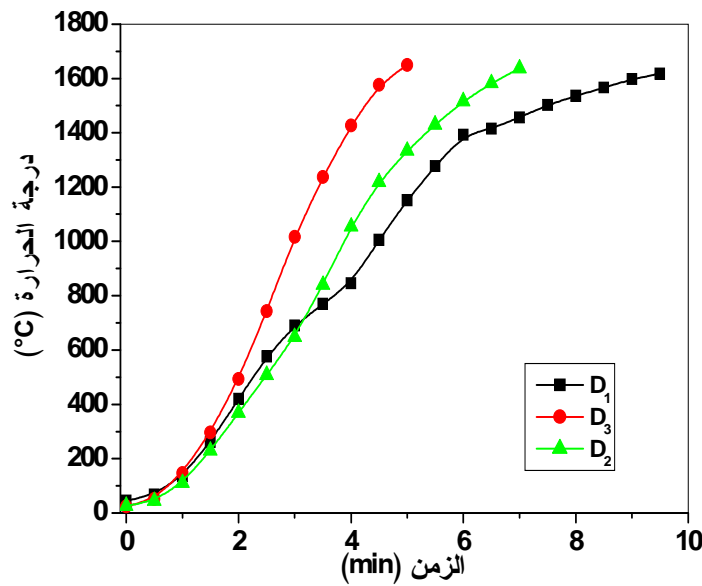
4.IV و 5.IV.



شكل 4.IV: تأثير قطر العازل الحراري على منحنيات التسخين المميزة لمادة الـ SiC ذات الحبيبات الكبيرة.

يمثل الشكل 4.IV منحنيات التسخين المميزة لعينات الـ SiC ذات الحبيبات الكبيرة بأقطار مختلفة للعازل الحراري. من الواضح جداً أنه لا يوجد تأثير ملموس لقطر العازل الحراري على التسخين إلى غاية الدقيقة الثانية من المعالجة بالميكرويف حيث المنحنيات الثلاث المميزة لكل عازل حراري تكاد تنطبق الواحد على الآخر مما يشير إلى أن سرعة التسخين ظلت ثابتة في هذه الفترة. بعد الدقيقة الثانية تنفصل المنحنيات شيئاً فشيئاً لتفترق تماماً مما يشير بوضوح إلى تأثير قطر العازل الحراري على عملية التسخين فكلما زاد قطر العازل الحراري كلما قلت السرعة التي تسخن بها عينات الـ SiC ذو الحبيبات الكبيرة. و كنتيجة نخلص إليها؛ تتناسب سرعة التسخين تناسباً عكسياً مع قطر العازل الحراري الداخلي. القيم المتوسطة لسرعات التسخين لكل عازل هي: $V_{D1}= 198.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، $V_{D2}= 295.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، $V_{D3}= 362.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$

يمكن اعتماد نفس الملاحظات و النتائج بالنسبة لتسخين العينات ذات الحبيبات الرقيقة من منحنيات الشكل 5. إلا أن هذه المنحنيات تنفصل بشكل مبكر و قبل الدقيقة الثانية مقارنة بسابقتها.



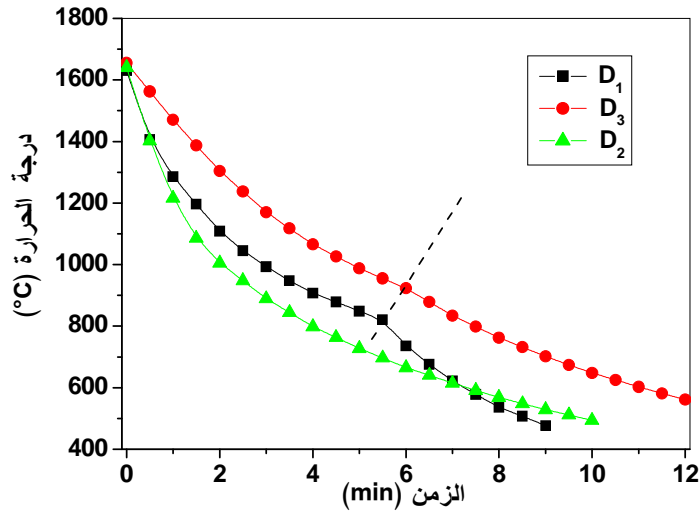
شكل 5.IV : تأثير قطر العازل الحراري على منحنيات التسخين المميزة لمادة الـ SiC ذات الحبيبات الرقيقة.

أما بالنسبة لسرعات التسخين المتوسطة لعينات الـ SiC ذات الحبيبات الرقيقة فوجدت كما يلي :

$$V_{D3}= 325.0^{\circ}\text{C}/\text{min} \text{ ، } V_{D2}= 230.1^{\circ}\text{C}/\text{min} \text{ ، } V_{D1}= 165.5^{\circ}\text{C}/\text{min}.$$

مما يمكن ملاحظته من منحنيات التبريد المميزة المعطاة في الشكلين 6.IV و 7.IV أن كلا نوعي كربايد السيلكون يبردان بشكل أبطأ في العازل الحراري ذي القطر الداخلي الصغير (D_3) مقارنة بالقطر المتوسط (D_2) والكبير (D_1). هذا ما تؤكدُه القيم المتوسطة لسرعات التبريد المقاسة:

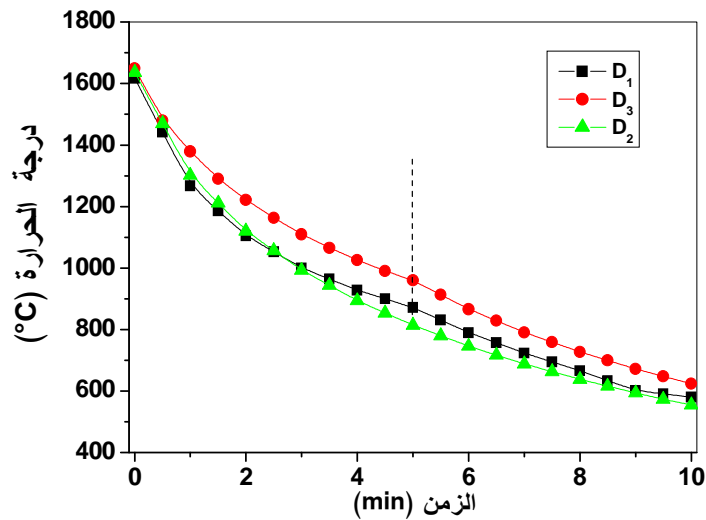
$$V_{C3}= 91.2^{\circ}\text{C}/\text{min} \ , \ V_{C2}= 114.7^{\circ}\text{C}/\text{min} \ , \ V_{C1}= 128.2^{\circ}\text{C} /\text{min}$$



شكل 6.IV : تبريد مادة الـ SiC ذات الحبيبات الكبيرة داخل عوازل حرارية مختلفة الأقطار ($D_1 > D_2 > D_3$).

أما بالنسبة لمادة كربايد السيلكون ذو الحبيبات الرقيقة وجدت القيم المتوسطة لسرعات التبريد كما يلي :

$$V_{C3}= 138.0^{\circ}\text{C}/\text{min} \ , \ V_{C2}= 164.6^{\circ}\text{C}/\text{min} \ , \ V_{C1}= 149.0^{\circ}\text{C} /\text{min}$$



شكل 7.IV : تبريد مادة الـ SiC ذات الحبيبات الرقيقة داخل عوازل حرارية مختلفة الأقطار ($D_1 > D_2 > D_3$).

كلما زاد القطر الداخلي للعازل الحراري كلما زادت سرعة تبريد المنظومة (عازل + عينة)، يمكن أن يرجع هذا لسببين: أولهما هو حجم الهواء المحيط بالعينات الاسطوانية (ع.ت.م.م) الذي يزداد بزيادة القطر الداخلي للعازل الحراري مما يجعل كمية التبادل الحراري كبيرة بين العينة و الوسط المحيط بها و من ثم يحصل تبريد أسرع للعينة. و ثانيهما؛ يتسبب اتساع الشق العمودي على مستوى القسم الخارجي للعازل الحراري عند درجات الحرارة العالية في تسرب كمية كبيرة من الحرارة إلى حجرة التسخين و من ثم إلى المحيط الخارجي مما يزيد في تسريع آلية التبريد. مع انخفاض درجة الحرارة يتقلص الشق العمودي للعازل الحراري فينتج عنه كبح تسرب الهواء الساخن إلى خارج العازل الحراري مما يعقد وصف منحنيات التبريد المميزة عند الأقطار D_1 و D_2 التي تبدو متداخلة بعد المرحلة الثانية من التبريد (هواء الغرفة).

من أجل معالجة مواد لا تتحمل الإجهاد الحراري الكبير يتوجب استعمال عوازل حرارية مدمجة أي ذات قطر داخلي أصغر ما يمكن لأنها تفضي إلى دورة تبريد أبطأ. أما المواد القادرة على تحمل إجهاد حراري كبير فيمكن استعمال عوازل حرارية ذات قطر داخلي أكبر.

بالرجوع إلى الشكل 4.IV و 5.IV يمكن تفسير تباطؤ سرعة التسخين عند بلوغ مادة كربايد السيلكون درجات حرارة عالية بتقلص عمق توغل موجات الميكرو في كربيد السلكون بتغير درجة حرارة هذا الأخير. حيث أن قيمة d_{SiC} عند درجة الحرارة الواطنة ($22^{\circ}C$) تكون مساوية إلى 4 cm و تنخفض قيمته بعشر مرات عند درجة الحرارة $695^{\circ}C$ لتصير 0.4cm فقط [104]. و هذا يقلل من كمية كربيد السلكون المتفاعلة مع موجات الميكرو وبالتالي يقلل معه الاستطاعة المحولة إلى حرارة بشكل كبير (شكل 8.IV). إن القيمة 0.4 cm d_{SiC} عند درجة الحرارة 695 cm هي أقل من سمك طبقة كربيد السلكون لسببوتور منظومة الميكرويف المقدر بـ 1.2 cm مما يسبب عدم وصول موجات الميكرو إلى الجزء العميق للـ SiC المحيطة بالمزدوج الحراري ويبقى الجزء الخارجي منه فقط معرضا لاشعاع موجات الميكرويف.

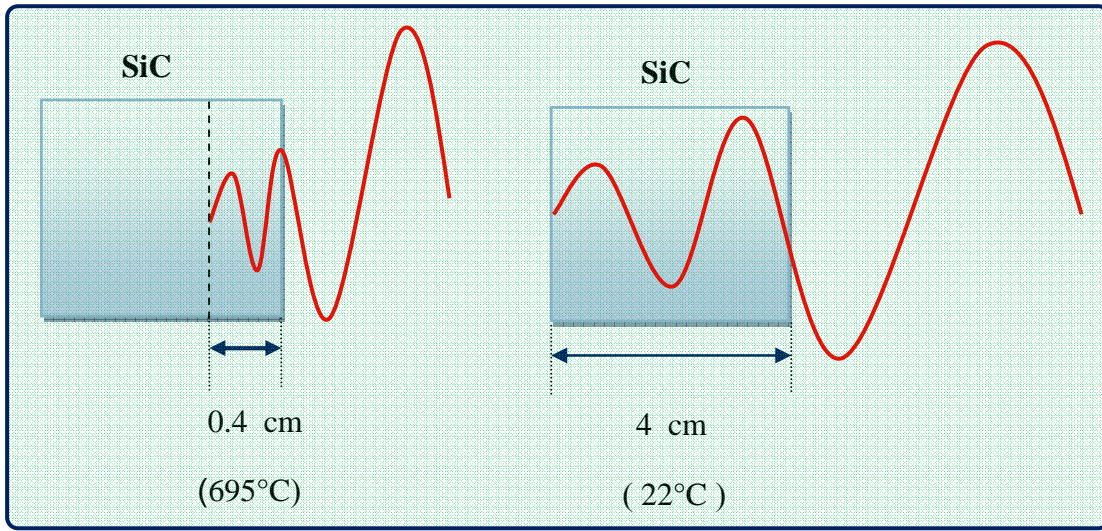
عمق توغل الميكرويف d معطى بالعلاقة التالية:

$$d = \frac{c \epsilon_0}{2 \pi f \epsilon''}$$

نلاحظ من هذه العلاقة أنه هناك تناسب عكسي لعمق التوغل مع معامل فقدان العازلية. وبما أن معامل الفقدان في حد ذاته دالة في درجة الحرارة و يتناسب طرذا معها فإن d يتناسب عكسا مع T

$$d \propto \frac{1}{\epsilon''(T)} \alpha T \Rightarrow d_{SiC} \propto \frac{1}{T_{SiC}}$$

المرحلة الأخيرة من عملية تسخين منظومة التسخين بالميكرويف المبينة في الشكل 1-IV تظهر بوضوح تباطؤ سرعة التسخين و اقتراب مادة SiC بالتدرج إلى قيمة عتبة الامتصاص التي عندها يتوقف عن امتصاص المزيد من موجات الميكرو وتحويلها إلى حرارة. لأن كل الجزيئات المكونة SiC تكون قد حولت استطاعة موجات الميكرو الواردة إليها ووصلت إلى حد التشبع. يمكن تقدير درجة الحرارة الموافقة لحد التشبع الخاصة بالـ SiC بحوالي 1650°C .



الشكل 8.IV: تغير عمق توغل موجات الميكرو مع درجة الحرارة في كربيد السيلكون (SiC).

3. 1-IV خلاصة

تزداد فعالية العازل الحراري كلما تقلص القطر الداخلي لهذا العازل. يتم الحصول، في طور التسخين، على سرعات معالجة عالية أما في طور التبريد يتم الحصول على سرعات منخفضة نسبياً. تتناسب سرعة التسخين تناسباً طردياً مع حجم حبيبات المادة المعالجة في الدقائق الأولى من التسخين ليتحول إلى تناسب عكسي و يتعاقب هذا التناسب بشكل دوري إلى غاية درجة حرارة أعلى من 1600°C . يشار إلى أن مادة كربايد السيلكون (SiC) التي أستخدمت كعينات في هذا القسم من الدراسة تعتبر ذات ناقلية حرارية عالية .

2. دراسة تأثير توزيع الاستطاعة/ الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة متعددة الأنماط على التسخين بميكرويف .

1.2-IV ملخص العمل المنجز يتفاعل حقل موجات الـ MW مع المواد الخزفية فيحدث في هذه الأخيرة تسخيناً حتمياً بواسطة ظاهرة فقدان العازلية مما يزيد في عملية التليد ويخفض درجة حرارة التكتيف و يحسن من انتظام البنية المجهرية مقارنة بالتسخين التقليدي. يرتكز هذا العمل على دراسة عامل مهم في التسخين بموجات الـ MW ذات التردد 2.45 GHz يتعلق الأمر بتوزيع الطاقة الكهرومغناطيسية داخل مطبق فرن موجات الـ MW. تم تسخين عينات من كربايد السلكون SiC مادة ماصة لموجات الـ MW صنعت بشكل أسطواني مجوف لتسمح بقياس درجة الحرارة عند تعرضها لإشعاع الـ MW. أنجزت بنجاح التجربة داخل فرن منزلي مزود بحجرة متعددة الأنماط مصنوعة من فولاذ غير قابل للأكسدة و مغنطرون يولد 850 W من طاقة موجات الـ MW. بينت التجربة أنه بات ممكناً تركيز طاقة موجات الـ MW في مناطق معينة بجوار عينات كربايد السلكون. الأكثر من هذا صار ممكناً تحويل حجرة متعددة الأنماط إلى حجرة أحادية النمط. إتفقت النتائج المحصل عليها بشكل واضح مع سرعات التسخين التي تم قياسها أثناء التجربة.

2.2-IV مقدمة

تعطي المعالجة الحرارية للخزفيات بموجات الميكرويف محاسن أفضل مقارنة بطرق التسخين التقليدية. تشمل هذه المحاسن على أزمنة تسخين أقصر و كذلك تحسين للخواص. يختلف التسخين بموجات الـ MW من حيث الأساس عن المعالجة الحرارية التقليدية في آلية التسخين في حد ذاتها. ففي موجات الـ MW تولد الحرارة داخل مادة العينة نفسها. عندما تتوغل موجات الميكرويف و تنتشر عبر المادة العزلة، تنتج الحقول الكهربائية الداخلية المتولدة داخل الحجم المعرض لإشعاع الموجات حركة انسحابية للشحن الحرة أو المقيدة كما تقوم هذه الحقول بإدارة الجزيئات المركبة مثل ثنائيات الأقطاب. تتسبب هذه الحركات المحدثة مقاومة ناتجة عن المرونة الداخلية و قوى الاحتكاك تتسبب بدورها في فقدان العازلية و تخامد أو انطفاء الحقل الكهربائي. كنتيجة لذلك يحدث عن هذا الفقدان ما يسمى بالتسخين الحجمي [111،112]

من المعلوم أن التفاعل بين موجات الميكرويف و المواد عامة يتعلق بشدة الحقل الكهرومغناطيسي. بالتالي يمكن زيادة فعالية التسخين بزيادة شدة هذا الحقل الذي يتعرض له المادة المعالجة، ولما كانت الاستطاعة التي يولدها فرن موجات الميكرويف لا تتجاوز في الغالب 1 KW في حالتنا هذه 850 W وغير قابلة للتغيير

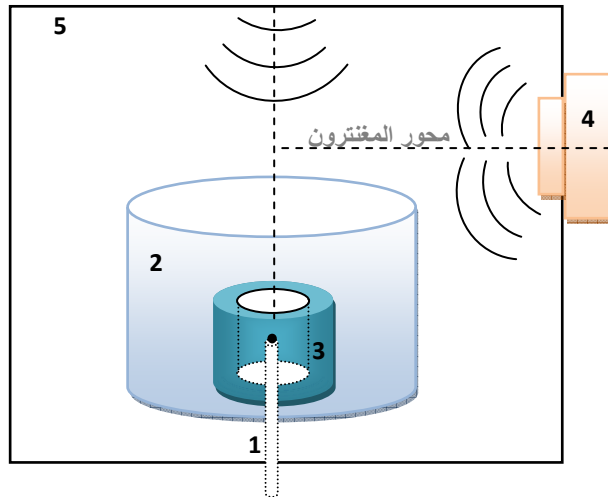
باستمرار فإن الطريقة البسيطة و الغير مكلفة لرفع فعالية التسخين هي محاولة تركيز الحقل الكهرومغناطيسي في الفضاء الذي تتواجد فيه المادة المراد معالجتها.

يتوقع أن تحدث تغيرات في الحقل الكهرومغناطيسي عند إدخال مادة ناقلة داخل حجرة MW متعددة الأنماط، هذا يعني أنه حتى عمود المزدوج الحراري المستعمل في قياس درجة الحرارة يمكن أن يحدث هذا النوع من التغيرات على مستوى الحقل الكهرومغناطيسي [113].

و كما أن أغلبية الحجرات أحادية النمط تصنع بشكل أسطواني في أغلبية الأجهزة العاملة بموجات الميكرويف بغية توليد نمط تجاوبي واحد أي بقعة ساخنة واحدة ، وذلك بتركيز الحقل الكهرومغناطيسي للموجات على طول محور الحجرة أحادية النمط . بالإضافة إلى أن العينات المستعملة في هذا الجزء من الدراسة لا يتجاوز كلا من طولها و قطرها 5 cm فان العديد من البقع الساخنة داخل الحجرة متعددة الأنماط لن تساهم في عملية تسخين العينات ذات الأبعاد المذكورة. يعتبر هذا العمل محاولة فريدة من نوعها لتحويل حجرة بسيطة متعددة الأنماط إلى حجرة أحادية النمط و ذلك بإقحام أسطوانة معدنية من الفولاذ غير قابل للأكسدة داخل حجرة متعددة الأنماط لفرن منزلي. كنتيجة لذلك العديد من أنماط التجاوب ذات سعة منخفضة ستتحول إلى نمط تجاوبي واحد ولكن بسعة اهتزاز أكبر في نفس الفضاء. و بهذه الطريقة تتولد طاقة كهرومغناطيسية أكبر في الحيز الذي تتواجد فيه العينات.

3.2-IV الطرق التجريبية

استعمل في هذه الدراسة فرن موجات ميكرويف منزلي (LG 850W, 2.45 GHz ,MC 805 AR model) مزود بحجرة فولاذية غير قابلة للأكسدة، تم أقلمته ليسمح بقياس درجات حرارة عالية. حيث تم نزع الأرضية الدوارة و تركيب حامل معدني للمزدوج الحراري من الأسفل. تم كذلك تركيب مزدوج حراري من البلاتين نوع-S (Pt-Pt10Rh) داخل الحامل المعدني وصل بالأرض كما ينبغي ويرتفع بـ 50 mm عن سطح القاعدة الداخلية لحجرة التسخين [114،115] (شكل 9.IV) .



شكل 9.IV: مخطط يوضح منظومة الميكرويف المستعملة؛ 1. مزدوج حراري، 2. اسطوانة معدنية، 3. عينة، 4. مغنطرون، 5. حجرة متعددة الانماط.

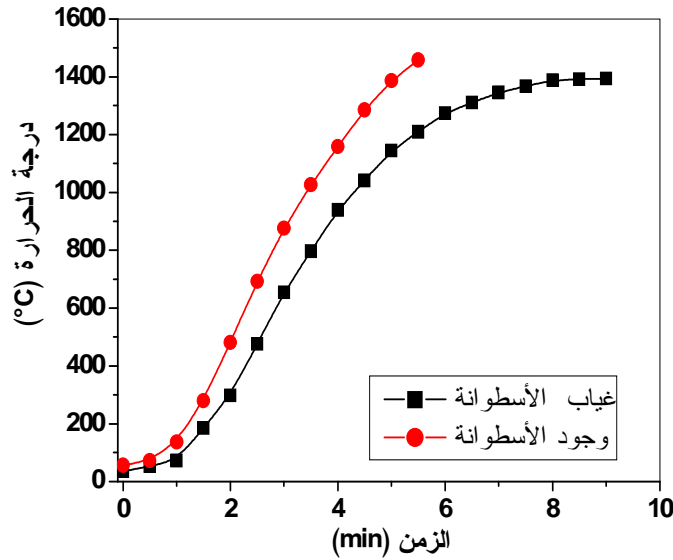
صنعت العينات من كربايد السيلكون (SiC) الذي يعتبر كمادة عالية الامتصاص للميكرويف و القدرة على تحويل طاقة الموجات إلى حرارة من درجة حرارة الغرفة (25°C) إلى حوالي 1600°C في حالتنا هذه. استعملت أسطوانة فولاذية مجوفة و غير قابلة للأكسدة ذات قطر 15,5 cm و طول يقدر بـ 6,0 cm من أجل تغيير تشكيلة الحقل الكهرومغناطيسي لموجات الميكرويف حيث تم وضع هذه الأسطوانة المعدنية على السطح السفلي لحجرة التسخين وفي مركزها تماما.

يجب أن يكون العازل الحراري المحيط بعينات الـ SiC داخل الأسطوانة المعدنية. صنع العازل الحراري المذكور من الألومينا الليفي ليحفظ الحرارة المولدة من العينات عند تفاعلها مع الميكرويف.

4.2-IV النتائج و مناقشتها

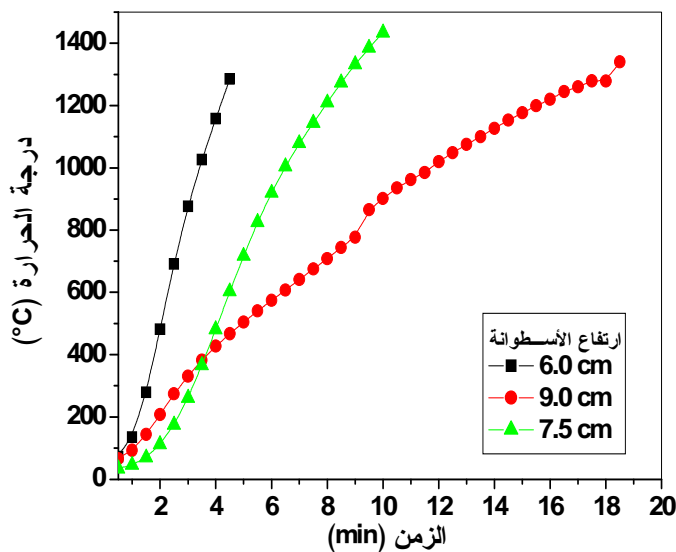
بغية دراسة تأثير توزيع الاستطاعة الكهرومغناطيسية على فعالية تسخين عينات الـ SiC تم وضع الأسطوانة المعدنية المجوفة على كلا من العازل الحراري و العينات ليحيط بهما مع مراعاة التناظر بالنسبة لمحور حجرة التسخين العمودي. تم بعدها تم تطبيق إشعاع الميكرويف باستطاعة خروج ثابتة قصوى تقدر بـ 850 W على المنظومة الموصوفة في الشكل 9. ثم قيست درجات الحرارة في حالتين إثنين: في حالة وجود الأسطوانة المعدنية و الحالة الأخرى في غيابها. كل قياس لدرجة الحرارة تم بعد خطوة زمنية تقدر بـ 30 s لمدة تتراوح بين 5 min و 9 min.

يظهر الشكل 10.IV بوضوح أن منحنى التسخين الناتج عن وجود الأسطوانة المعدنية يعلو تماما منحنى التسخين في غياب الأسطوانة المعدنية.



شكل 10.IV: تغير درجات الحرارة بدلالة الزمن قبل و بعد إقحام الأسطوانة المعدنية المجوفة.

تدل النتيجة المحصل عليها على وجود ظاهرة تركيز للميكرويف تسببت في رفع درجة حرارة التسخين. بالإضافة إلى ذلك و من أجل دراسة تأثير ارتفاع الأسطوانة المعدنية تم رفع هذه الأخيرة بإقحام قطع خزفية حلقيه الشكل معلومة الطول بين قاعدة الأسطوانة و الجدار السفلي لحجرة التسخين. بعدها قيست درجات الحرارة بخطوة 30 s لمدة تتراوح بين 4 min إلى 20 min النتيجة مبينة في الشكل 11.IV. كما هو مبين في هذا الشكل عندما يزداد قيمة الارتفاع من 6 cm إلى 9 cm فإنه تنزاح منحنيات التسخين باتجاه قيم زمنية أطول على المحور الأفقي لمنحنى الشكل 3. و كنتيجة لذلك تنخفض سرعة التسخين من $288,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ إلى $73,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ مروراً بالقيمة $145,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ عند الارتفاع 7,5 cm .

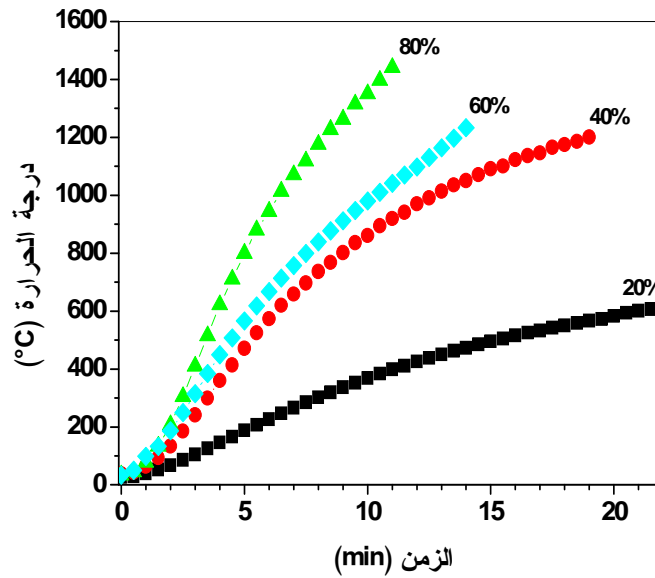


شكل 11.IV: تغير درجات حرارة المنظومة بدلالة ارتفاع الاسطوانة.

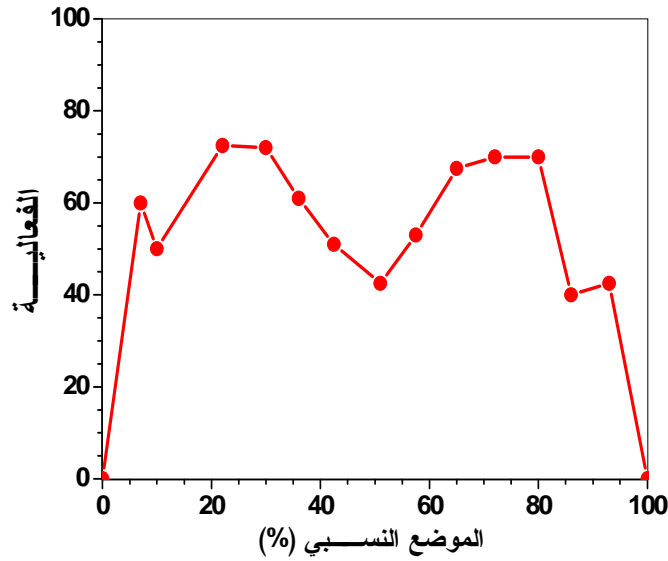
إذا تم الأخذ بعين الاعتبار سرعة التسخين بالميكرويف فإن الارتفاع 6 cm للأسطوانة المعدنية أعطى أعلى سرعة تسخين متوسطة. يمكن أن تعزى هذه الزيادة في سرعة التسخين إلى توزيع الحقل الكهرومغناطيسي داخل الحجرة متعددة الأنماط لفرن الميكرويف. و بكلمة أخرى يزداد عدد النقاط التي تعطي فيها تداخلات الميكرويف تداخلات بناءة أي يقع ساخنة أو أنماط تجاوب داخل تجويف الأسطوانة المعدنية.

يكشف بالتالي كل منحنى من منحنيات الشكل 11.IV عن معلومات تخص توزيع الحقل الكهرومغناطيسي داخل حجرة التسخين متعددة الأنماط. فكلما ازداد ارتفاع الأسطوانة كلما قلت فعالية التسخين. يمكن إيعاز انخفاض فعالية التسخين هذه إلى حقيقة أن ارتفاع الأسطوانة كان يقترب شيئاً فشيئاً من مستوى محور مغنترون فرن الميكرويف شكل 9.IV الذي عنده يقل بشدة إنتاج أنماط التجاوب " البقع الساخنة الناتجة من التداخلات البناءة التي تحدثها الانعكاسات المختلفة للميكرويف في الفضاء المحدود بتجويف الأسطوانة المعدنية ".

طبقت عدة نسب لإستطاعات خروج الميكرويف على المنظومة الممثلة بالأسطوانة المعدنية و ما يحويه تجويفها، هذه النسب هي على الترتيب 80% و 60% و 40% و 20% من الاستطاعة القصوى (850 W)
(لمدة تسخين تمتد من 5 min إلى 25 min)



شكل 12.IV: تغير درجات الحرارة بتطبيق نسب استطاعة مختلفة من الاستطاعة القصوى.



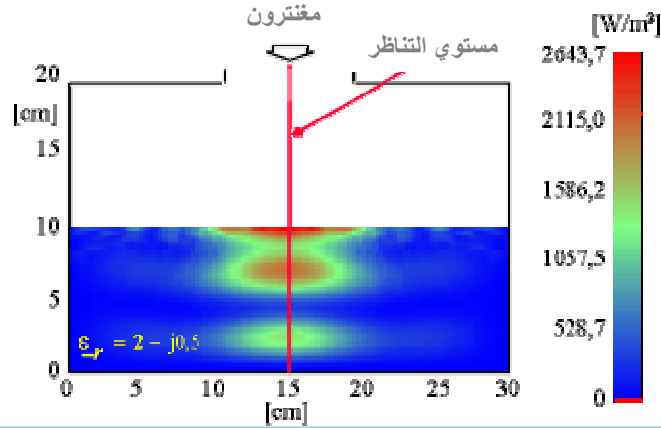
شكل IV.13: الفعالية المحولة لموجات الميكرويف إلى حرارة بدلالة الموضع النسبي في اتجاه أطول جدار لـحجرة متعددة الأنماط ذات الأبعاد $48\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 38\text{ cm}$. الشكل أعيد رسمه من [116،117].

كما قيست درجات الحرارة كل 30 s. يبين الشكل 12.IV المنحنيات الموافقة ، ففي هذا الشكل من السهل ملاحظة أنه عندما تنخفض نسبة الاستطاعة من % 100 إلى % 20 فإن هذا يؤدي إلى انخفاض في درجات الحرارة القصوى المسجلة، ففي الدقائق الخمسة الأولى من التسخين كانت قيم درجات الحرارة الموافقة لكل نسبة استطاعة على الترتيب: 1350°C و 950°C و 660°C و 580°C و 230°C .

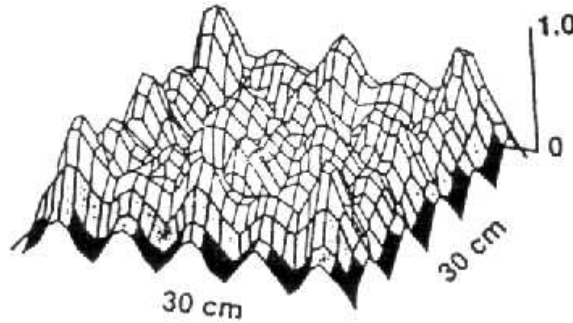
من المنتظر أن يكون توزيع الحقل الكهرومغناطيسي للميكرويف غير منتظم و بالأخص الحقل الكهربائي داخل الحجرة متعددة الأنماط المستعملة في هذا القسم من الدراسة، كما هو الحال في حجرات الميكرويف ذات الأبعاد الغير قابلة للتغيير بهذا الحجم [116،117].

يظهر الشكل 13.IV أن فعالية التحويل يمكن أن تتغير مع الموضع من % 0 إلى % 100 لـحجرة ميكرويف ذات أبعاد مماثلة لتلك المستعملة في عملنا هذا. تتغير فعالية التحويل صعودا و نزولا مع الموضع حيث أن النقاط التي تفصلها بضع سنتمترات الواحدة عن الأخرى تتلقى مقداراً مختلفاً من طاقة الميكرويف. يعكس هذا السلوك حقيقة مفادها أن توزيع طاقة الميكرويف داخل حجرة مغلقة يتغير تبعا لأطراف موجات مستقرة [117]. بالتالي يظهر هناك قمم و سفوح تشبه مرتفعات و منخفضات في شدة طاقة موجات الميكرو عبر حجم حجرة التجارب التي تكون حتما ذات أنماط متعددة.

يظهر الشكل 14.IV بوضوح أن الاستطاعة الكهرومغناطيسية في فرن موجات ميكرويف منزلي تكون متقطعة و بالتالي غير مستمرة ليس فقط في البعدين المحددين لسطح الحجرة و إنما في الأبعاد الثلاثة المحددة لحجم الحجرة بأكملها كما بينته الحسابات و استنتجته محاكاة الحاسوب (شكل 15.IV).

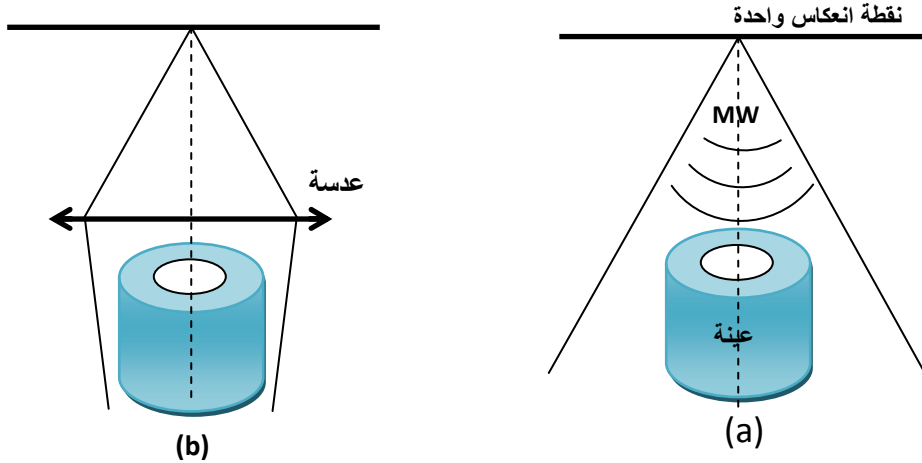


شكل 14.IV : تبديد الاستطاعة الكهرومغناطيسية على شكل حرارة داخل حجرة متعددة الأنماط لفرن ميكرويف [118].



شكل 15.IV: توزيع الاستطاعة داخل حجرة فرن ميكرويف تعمل بالتردد 2.45GHz [119].

وضع مخطط توضيحي في الشكل 16.IV لتقريب مفهوم ظاهرة تركيز موجات الميكرويف. يظهر من خلال هذا الشكل أن الأسطوانة المعدنية تلعب دور عدسة مجمعة كهرومغناطيسية، مما يعني بوضوح أن جزءا من طاقة موجات الميكرويف المنعكسة بعيدا عن العينة يمكن تجميعها و بالتالي تضخيمها في فضاء تواجد العينة و ذلك بعد إقحام الأسطوانة المعدنية.



شكل 16.IV: مخطط يوضح ظاهرة تركيز موجات الميكرويف. قبل (a) و بعد إقحام الاسطوانة المعدنية (b).

5.2-IV خلاصة

تم في هذه الدراسة و بنجاح غير مسبوق النضير تضخيم شدة حقل موجات الميكرويف في فضاء تواجد عينات من مادة الـ SiC ذات قطر 5 cm. و ذلك بتحويل جزء من حجم حجرة متعددة الأنماط لقرن منزلي إلى حجرة أحادية النمط. وجد أن هذا بات ممكنا باستعمال أسطوانة معدنية مجوفة على شكل أنبوب ذات قطر يقارب طول موجة الميكرويف العاملة بالتردد 2.45 GHz في مركز حجرة كلاسيكية متعددة أنماط التجاوب. هذا ما سمح بتبئير توزيع الاستطاعة الكهرومغناطيسية وبالتالي رفع سرعات التسخين بشكل معتبر.

3. دراسة تأثير سمك و إتجاه العازل الحراري على التسخين بالميكرويف

1.3-IV ملخص العمل المنجز

في هذا القسم من الدراسة تم تصميم عازل حراري من الالومينا الليفي (Al_2O_3) على شكل علبه متوازية المستطيلات بغية الحفاظ على درجة الحرارة من الضياع. تم توليد الحرارة من منبع السببوتور الذي أستعمل كمادة ماصة لموجات الميكرويف العاملة بالتردد 2.45GHz داخل علبه العازل الحراري . حيث تم تغيير سمك مختلف جهات علبه الالومينا العرضية و الطولية و العمودية و هذا من أجل دراسة مستوى نفوذ الحقل الكهرومغناطيسي للميكرويف القادم من زوايا السقوط الأفقية و العمودية داخل مادة العازل الحراري. من ثم تم تحديد مقدار ورود اشعاع الميكرويف لكل جهة من جهات العلبه العازلة. تم هذا ببساطة بقياس تغيرات درجات الحرارة كل 30 ثانية لمدة 5 دقائق من زمن المعالجة. بينت التجارب أن هناك زيادة في درجات الحرارة المسجلة كلما انخفض السمك العلوي و الطولي للعازل الحراري. في المقابل تم تسجيل انخفاض غير متوقع لدرجات الحرارة مع تقلص السمك العرضي لعلبه العازل. علاوة على ذلك تمت مناقشة النتائج المحصل عليها على ضوء ظاهرة التفريغ الكهربائي الحاصل داخل الفجوات الميكروية لمادة الالومينا الليفي. الأكثر من هذا تم دراسة تأثير مختلف وضعيات (توجهات) العازل الحراري داخل حجرة الميكرويف. تم اكتشاف أن توجهات معينة للعازل الحراري أعطت كفاءة تسخين أعلى.

2.3-IV مقدمة

استعمل العازل الحراري بشكل واسع في عمليات التلييد بالميكرويف من أجل تفادي الضياع الحراري من السببوتور و تحسين انتظامية توزيع درجة الحرارة. يعتبر تصميم العازل الحراري عملية حاسمة في نجاح المعالجة بالميكرويف لأن ليس عليه ان يقلل قدر الامكان من ضياع الحرارة من السببوتور وإنما كذلك يساعد على التوزيع الحسن لاستطاعة الميكرويف داخل الحمل [120].

يعتبر الألومينا الليفي و الزركونيا الليفي موادا شائعة الاستعمال كعوازل حرارية لكثرة توفرها تجاريا. بالإضافة إلى احتوائها على نسبة عالية من الفجوات (مسامات) وامتلاكها ناقلية حرارية منخفضة وشفافية تقريبا لموجات الميكرويف عند درجة حرارة الغرفة [120،121]. كما أن ألواح الالومينا الليفي تعتبر مواد عالية الشفافية للميكرويف بالأخص عند درجات الحرارة الأقل من $1600^{\circ}C$ ، فعمق امتصاصها الذي يدعى

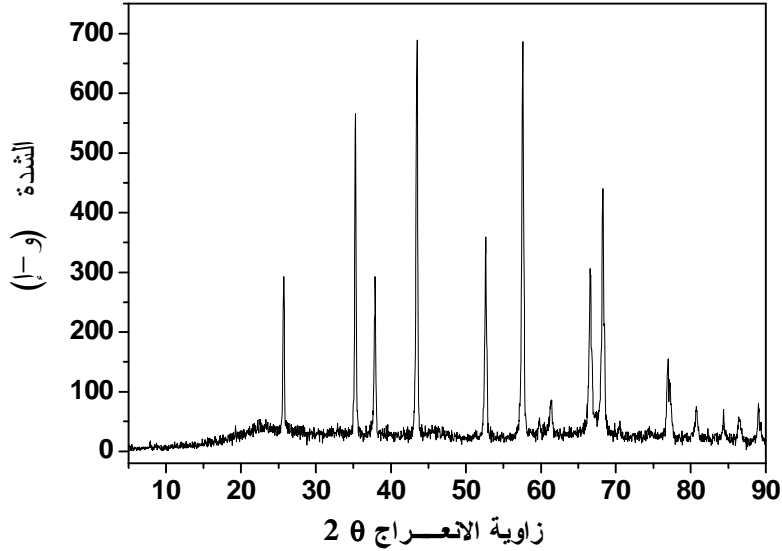
كذلك بعمق القشرة من رتبة المتر [122]. تعتبر هذه القيمة لعمق قشرة الألومينا أكبر بشكل ملحوظ من أبعاد حبات الميكرويف المستعملة عادة في المختبرات من أجل معالجة المواد. يستنتج مما سبق أن تغيير أبعاد العازل الحراري الألوميني بضع سنتمترات لن يكون له تأثير على مقدار نفوذ حقل الميكرويف و بالتالي على فعالية التسخين. مع ذلك أظهرت الدراسة على وجود اثر غير متوقع الذي يؤكد على تغير فعالية التسخين مع على الأقل تغير بعد واحد من أبعاد العازل الحراري. ربما يرجع عدم اهتمام الباحثين بالتوجه لدراسة هذه الظاهرة إلى القيمة النظرية العالية لسماك قشرة مادة الالومينا.

باتحاد مواد ليفية عازلة مختلفة كـ ZrO_2 و Al_2O_3 و بعد استعمالها من قبل العديد من الباحثين الذين ادعوا أهمية العازل الحراري في المعالجة بالميكرويف لبلوغ درجات حرارة عالية و معدل تسخين متسارع و تقليص التدرجات الحرارية في العينة [120-124]. يستمر حديثاً استعمال العازل الحراري في المعالجة باستعمال الميكرويف خاصة لغرض تلييد المواد الخزفية [77-78، 82]. مع ذلك و حسب اطلاقنا لم تقد أي دراسة تخص تأثير تغيير كلا من سمك وتوجه العازل الحراري. الأكثر من هذا، أجريت القليل من الدراسات التجريبية و بشكل جزئي على تأثير تغير سمك العازل الحراري [128]. على النقيض من ذلك فإنه أجريت العديد من الدراسات الحسابية المعتمدة على المحاكاة باستعمال الكمبيوتر على تغيير سمك العازل الحراري [124، 129]. مع ذلك هذه المحاكاة لم تأخذ بعين الاعتبار كل المعاملات التي يمكن أن تساهم في تحسين، إلي ابعاد حد ممكن، العازلية الحرارية للمواد المستعملة في المعالجة بالميكرويف. واحد من أهم هذه المعاملات يخص طاقة الميكرويف المفقودة على شكل حرارة عن طريق التفريغ الكهربائي الحادث في فجوات محددة للعازل الحراري (طاقة موجات الميكرويف المفقودة داخل العازل الحراري لا تساهم في عملية تسخين المادة المراد معالجتها).

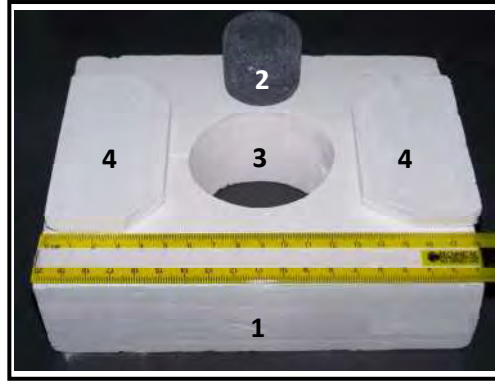
يهدف هذا العمل إلى إعطاء إجابة واضحة على ماهية مقدار سمك و وضعية العازل الحراري، المستعمل غالباً في أجهزة المعالجة بموجات الميكرو، الذي يجب أن تأخذ للحصول على أعلى كفاءة تسخين ممكنة.

3.3-IV الطرق التجريبية

كانت مادة الانطلاق المستعملة في هذه الدراسة عبارة عن ألواح من الألومينا ألفا الليفي النقية تتحمل درجة حرارة تقدر بـ $1600^{\circ}C$ و كانت تحوي على كمية قليلة من رابط عضوي قابل للاحتراق. كانت هذه الألواح، كما سلمت من قبل شركة SORED-UPM ، ذات شكل مستطيل بطول 100 cm و عرض 50 cm و ارتفاع 5 cm . يؤكد طيف انعراج أشعة X النقاوة العالية و البلورة الجيدة للألومينا الليفي المستعمل (شكل IV.17).

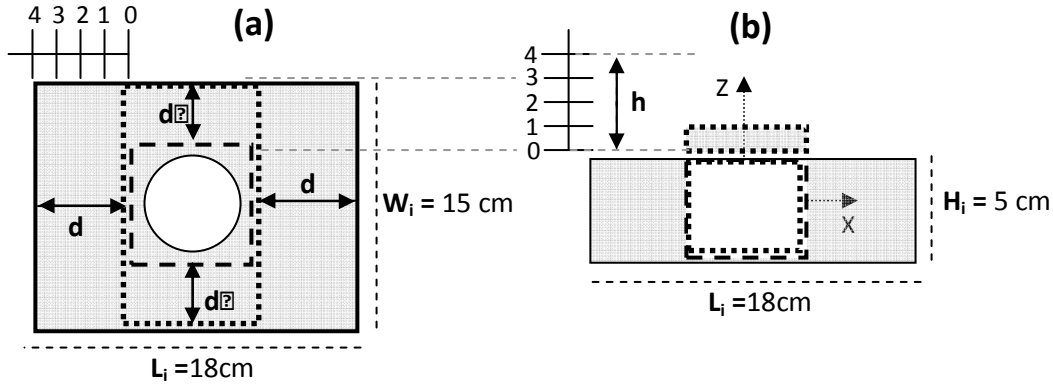


شكل 17.IV : طيف انعراج أشعة x للوح الالومينا ألفا الليفي.

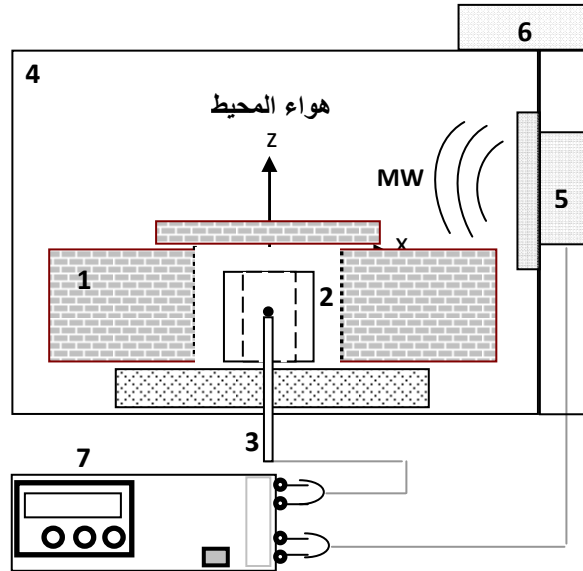


شكل 18.IV: (1) علبة العازل الحراري، (2) أسطوانة السبنتور، (3) تجويف العازل، (4) غطاء علبة العازل.

تم قص قطعة مكعبة الشكل من الألواح المذكورة ذات أبعاد $(L_i \times W_i \times H_i)$ (18 cm x 15 cm. x 5 cm.) بعدها تم إحداث ثقباً بقطر 6.5 cm في مركز المكعب ليأخذ شكل علبة شكل 18.IV. أخضعت العلبة المحصل عليها لمعالجة حرارية داخل فرن تقليدي للتخلص من الرابط العضوي عند درجة الحرارة 1200°C . تم تغيير سمك مختلف أبعاد علبة العازل الحراري بعملية قطع يدوية شكل 19.IV. يتم وضع علبة العازل الحراري، بعد كل عملية قطع، داخل حجرة التسخين لفرن الميكرويف شكل 20. بعدها تم تشغيل الفرن بضبطه على نسبة الاستطاعة % 60 من الاستطاعة القصوى (850 W). قيست درجات حرارة المنظومة كل 30 s لمدة 5 min من زمن المعالجة.



شكل 19.IV: أبعاد علبة العازل الحراري؛ (a) منظر علوي، (b) منظر عرضي. الخط المستمر؛ الأبعاد الابتدائية، الخط المنقطع؛ الأبعاد النهائية، الخط المنقط؛ الأبعاد المحسنة.



شكل 20.IV: مخطط لمنظومة الميكرويف المستعملة. (1) علبة العازل الحراري، (2) سسبتور الميكرويف، (3) مزدوج حراري، (4) مطبق الميكرويف، (5) منبع الميكرويف (مغنترون)، (6) نظام التبريد، (7) جهاز التحكم في درجة الحرارة.

تم تغيير سمك الجهة العلوية فقط في الجزء من علبة العازل الحراري الذي كان يتعرض لورود عمودي للحقل الكهرومغناطيسي للميكرويف (شكل 20.IV). هذا يعني أن السمك السفلي لعلبة العازل لم يتغير و بقي ثابتا عند القيمة 2 cm.

أستعمل في هذه الدراسة فرن ميكرويف منزلي (LG 900W, 2.45 GHz, MC 805 AR model) مجهزا بحجرة متعددة الأنماط غير قابلة للتأكسد تم أقلمتها لتسمح بقياس درجات الحرارة. تم تغطية المزدوج الحراري بأنبوب من البلاتين لتجنب تفاعله مع الميكرويف مما سمح بثبوت تزايد درجات

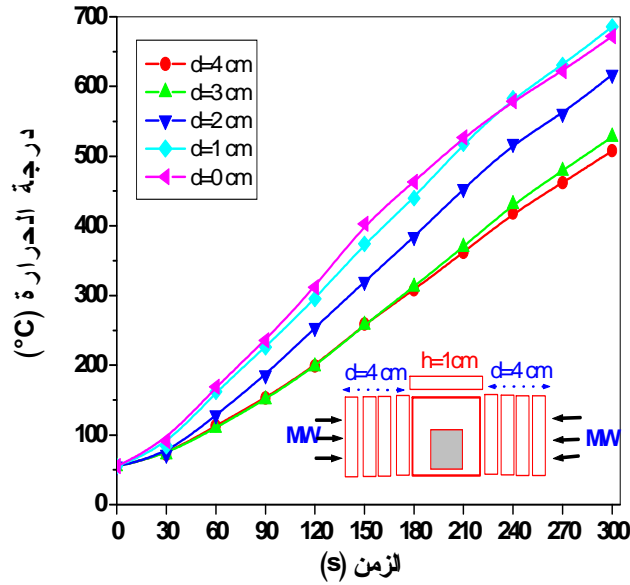
الحرارة أثناء التسخين. علاوة على ذلك تم تركيب نظام تبريد إضافي في أعلى جهاز الميكرويف فوق المغنطرون مباشرة لتفادي تسخنه بشكل متزايد. وجد أن هذه الخطوة التقنية كانت ضرورية لأن أقفال الحماية كانت تغلق التغذية الكهربائية على الفرن لما يبلغ هذا الأخير درجة حرارة حرجة نتيجة لتسخنه المفرط أثناء التجربة و كنتيجة لذلك يتوقف توليد الموجات. بهذه الطريقة تم منع انقطاع المغنطرون عن الاشتغال و بالتالي إمكانية تمديد أزمدة المعالجة.

صنع سبنتور الميكرويف (شكل 18.IV) من مركب كثيف نسبيا من كربايد السلكون SiC ذو شكل أسطواني يعمل على امتصاص طاقة الميكرويف الكهرومغناطيسية و تحويلها إلى حرارة [130].

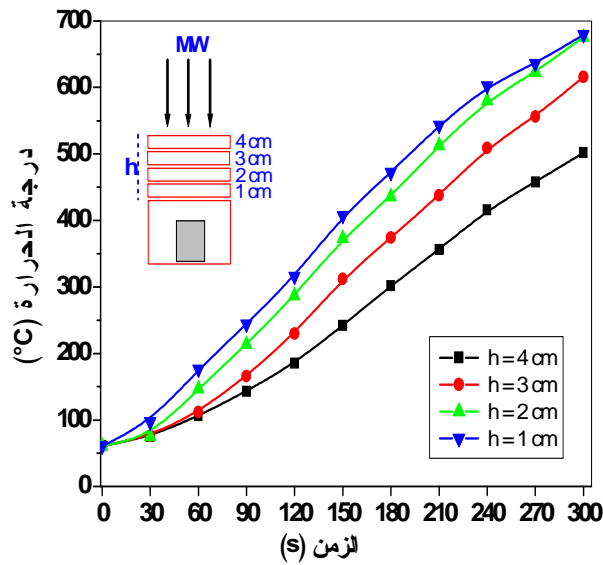
4.3-IV النتائج و مناقشتها

1.4.3-IV تأثير سمك العازل الحراري

تم تحسين أداء العازل الحراري بتغيير أولا أبعاده الطولية. يظهر الشكل 21.IV. تغيير درجة الحرارة داخل علبة العازل بدلالة زمن المعالجة عند سموك طولية مختلفة (عمودي على انتشار الميكرويف). من هذا الشكل يمكن ملاحظة أنه عندما ينخفض سمك كلا من الجهتين الطوليتين (d في الشكل 19.IV) باتجاه المحور x فان درجة حرارة المنظومة تزداد. نفس الظاهرة يمكن ملاحظتها لما يغير السمك العمودي لعلبة العزل الحراري (السطح العلوي الموازي لجهة انتشار الميكرويف) (شكل 22.IV). مع هذا فان النتيجة تبدو متناقضة مع ما هو متوقع أن يحدث في العازل الحراري في التسخين التقليدي. عادة، تحفظ الحرارة بشكل جيد عندما يكون العازل الحراري المحيط بالمنبع الحراري التقليدي أنخن (أكثر سماكة). بما أن مادة الألومينا الليفي المستعملة في بناء علبة العازل الحراري قيد الدراسة عالي النقاوة نسبيا فإنه يتوقع أن يكون امتصاص موجات الميكرو من قبل الشوائب الناقلة المحتمل وجودها ضعيفا و بالتالي فإنه لا يتوقع أن تنخفض كمية الطاقة الحرارية التي يولدها السبنتور (عنصر التسخين) بكمية معتبرة و قابلة للقياس من جراء الشوائب الناقلة. يمكن لكثافة الفجوات داخل مادة الألومينا الليفي أن تلعب دورا مهما في الظاهرة الملاحظة كون الطور الغالب في مادة العازل الحراري هو عبارة عن فراغات أو فجوات. في الحقيقة كشف التحليل باستعمال جهاز قياس الفجوات الزئبقي عن وجود توزيع متجانس

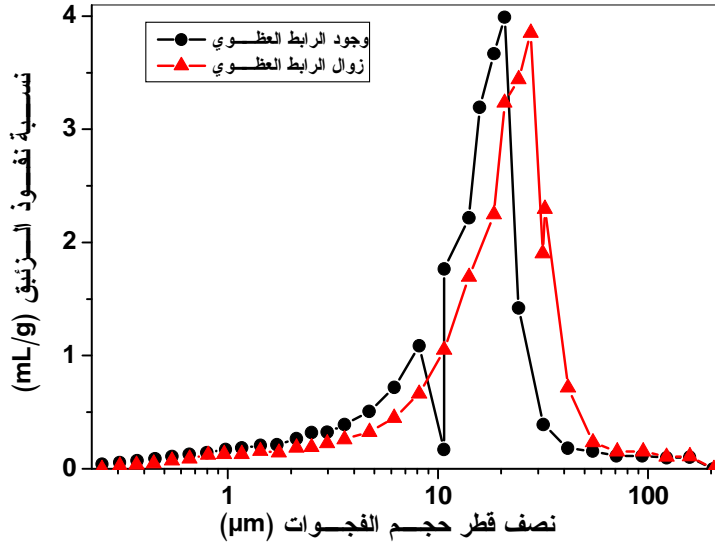


شكل 21.IV : درجة الحرارة بدلالة تغير السمك العرضي d للعازل في اتجاهي المحور X.

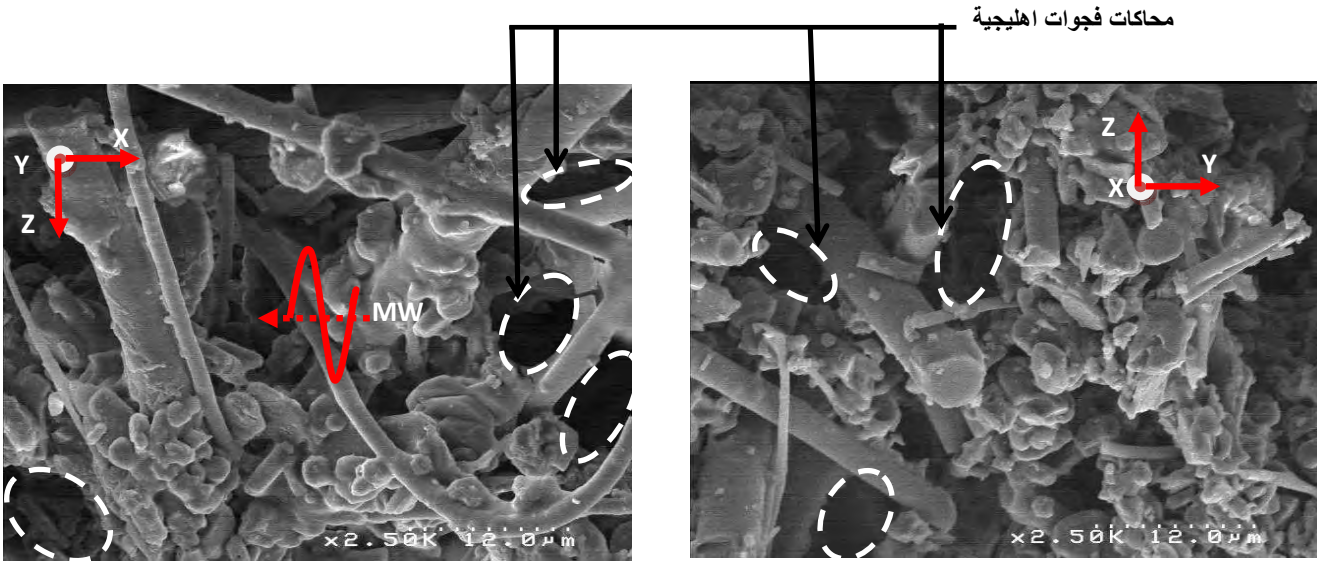


شكل 22.IV : درجة الحرارة بدلالة تغير السمك العمودي h للعازل في اتجاه واحد للمحور Z. السمك العرضي d' ثبت عند قيمته الفضلى (4 cm).

لحجم الفجوات أحادي الشكل بنسبة فجوات عالية قدرت بـ 85-87% و متوسط قطر فجوات مقدر بـ $16.5-23.2 \mu\text{m}$ شكل 23. إنه من المعلوم بشكل جيد أنه لما يسخن Al_2O_3 الليفي في الهواء الجوي بالميكرويف فإن الطاقة المخزنة في الفجوات تكون أعلى من تلك الموجودة في الحبيبات. تكون الطاقة عالية في الفجوات فتجبر الفجوات دوماً، عند درجات حرارية أعلى من 1000°C ، على تقليص حجمها



شكل 23.IV: نسبة نفوذ الزنك بدلالة نصف قطر حجم فجوات لوح الـ Al_2O_3 الليفي قبل و بعد حرق الرابط العضوي.

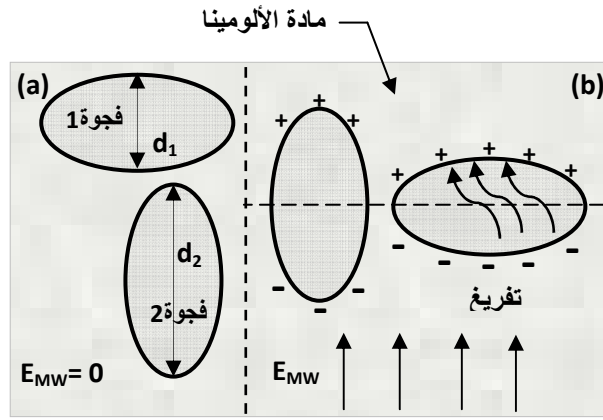


شكل 24.IV: صور المجهر الالكتروني الماسح للبنية المجهرية لـ Al_2O_3 الليفي تظهر بعض الفجوات التي تم محاكاتها على أشكال بيضاوية (اهليجية).

و أن تكون أصغر [131،128]. عندما يكون الحقل الكهربائي عال جدا، في بعض الأحيان تتدلع بلازما فجأة داخل الفجوات فترتفع درجة الحرارة حول الفجوات نتيجة لتسخين موضعي مجهري [128].

عندما تمت عملية كلسنة المادة العازلة أدى ذلك إلى حرق الرابط العضوي وطرد غازاته إلى الجو و حل محله فجوات ساكنة (بحدود صلابة). يمكن لهذه الفجوات المختلفة الأشكال و الأقطار، كما يظهر في

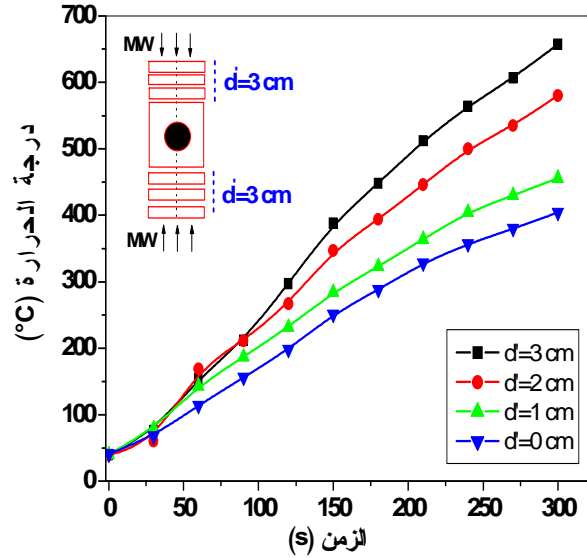
الشكل 24.IV ، أن تحاكي بأشكال بيضاوية داخل مادة الألومينا الليفي. عند قطر حرج يكون الحقل الكهربائي للميكرويف المطبق على الفجوات ذو شدة كافية لحدوث تفريغ كهربائي في الفضاء الحر للفجوات ذات الأقطار الحرجة. يخلق هذا التفريغ مواقع ماصة للميكرويف ناتج عن تولد درجة حرارة موضعية مرتفعة وبناء على ذلك يفقد جزءا من طاقة الميكرويف بعيدا عن السستور. لهذا السبب تتباطأ سرعة تسخين المنظومة كما يظهره الشكل 21.IV و الشكل 22.IV. لحسن الحظ تكون كثافة التفريغ موضعية و لا تستطيع الحرارة أن تنتشر عبر حجم العازل الحراري لسببين اثنين؛ أولها كون الناقلية الحرارية المنخفضة لحبيبات الألومينا في حد ذاتها و ثانيها وجود فجوات ذات حجم أوسع تلعب دور حواجز حرارية تمنع انتشار الحرارة من الفجوات الحرجة. يمكن أن يكون سبب ذلك التوجهات المختلفة لمحاور الفجوات الحرجة مع الحقل الكهربائي للميكرويف. كل الفجوات بيضاوية الشكل ذات القطر الحرج (d_1) و المتوجهة باتجاه حقل كهربائي للميكرويف يجب أن تولد تفريغا كهربائيا مجهريا (شكل 25) ناتجا عن بلوغ كمون الانقطاع الخاص بحجم الفجوات المعينة (الفضاء الحر).



شكل 25.IV: رسم توضيحي للتفريغ الكهربائي داخل الفجوات إهليجية الشكل تبعا لتوجهها مع الحقل الكهربائي E_{MW} للميكرويف: (a) قبل تطبيق الميكرويف، (b) بعد تطبيق الميكرويف؛ الفجوة 1 تظهر تفريغا في اتجاه قطرها الصغير d_1 . الفجوة 2 لا تظهر تفريغا في اتجاه قطرها الكبير d_2 .

يستهلك التفريغ الكهربائي المذكور طاقة ميكرويف معتبرة. بالتالي تقلص سمك العازل يؤدي إلى تقليل عدد المواقع التي يحدث فيها التفريغ الكهربائي. و كنتيجة لذلك تخترق موجات الميكرويف العازل، باتجاه السستور، بدون ضياع كبير للطاقة. على عكس النتائج المحصل عليها في الشكلين 20 و 21.IV فان النتيجة المحصل عليها من تغيير السمك العرضي (باتجاه المحور y) (موازي لاتجاه انتشار حقل الميكرويف) بدلالة درجة الحرارة غير متوقعة. في الحقيقة يظهر الشكل 26.IV بوضوح أن تقليل هذا السمك (d') من كلا جهتي علبة العازل باتجاه المحور y يؤدي إلى تخفيض درجة الحرارة

المقاسة. في حين يمكن أن يقال العكس في حالة الشكل 26.IV. يحتمل أن يعزى هذا إلى إعادة توزيع الحقل الكهرومغناطيسي للميكرويف داخل الحجرة متعددة الأنماط [132].



شكل 26.IV: تغير درجة الحرارة بدلالة السمك العرضي d' في كلا اتجاهي المحور y (منظر علوي)

كمحاولة لفهم قانون تغير درجة حرارة التسخين مع مختلف السموك (d, d', h) تم رسم منحنيات الدوال التالية: $T_{\max}(d)$ و $T_{\max}(d')$ و $T_{\max}(h)$ كما هو مبين في الشكل 27 (a) و (b) و (c). من هذه الأشكال يمكن استنتاج درجة الحرارة القصوى (الرياح في درجة الحرارة)، التي بلغت المنظومة بعد تحسين العازل كما ينبغي، من العبارة التالية :

$$\Delta T_{\max}(d, d', h) = T_{\max}(d=1 \text{ cm}) - T_{\max}(d=4 \text{ cm})$$

حيث تم تثبيت d' و h عند قيمتهما المفضلة 3.0cm و 1.0cm على الترتيب. حسابيا وجد أن :

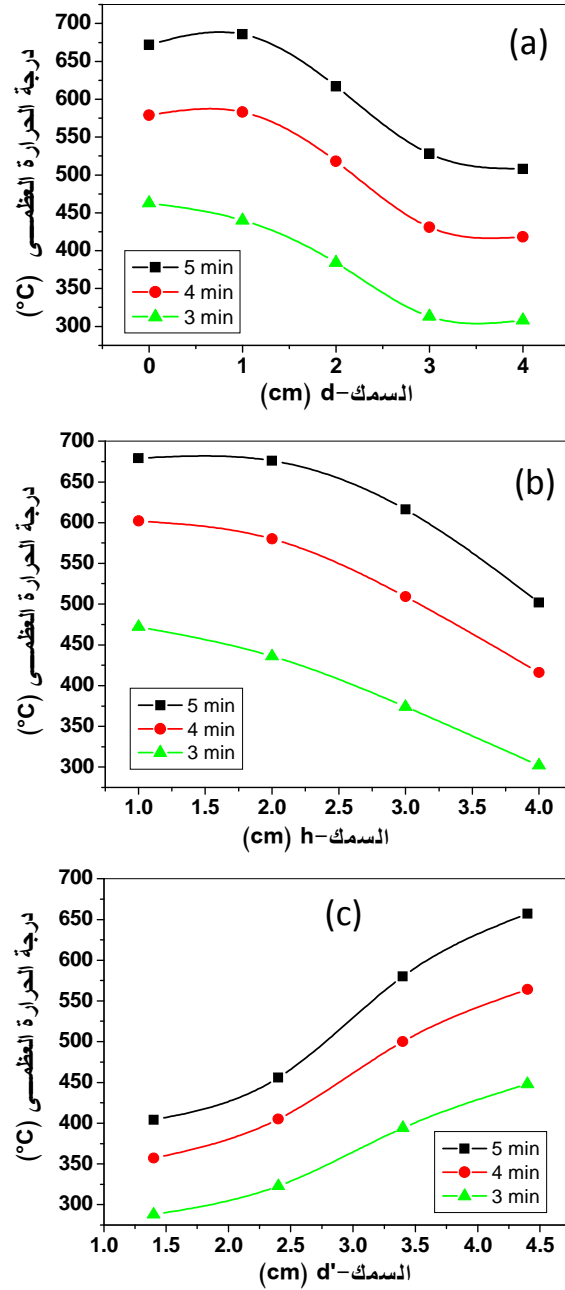
$$\Delta T_{\max}(d, d', h) = 180^\circ\text{C} \quad (687^\circ\text{C} - 507^\circ\text{C}).$$

تحسين أبعاد العازل الحراري (optimization).

إذا تم اخذ بعين الاعتبار أهمية فعالية نفاذية الميكرويف داخل العازل الحراري فان السموك الثلاثة التي ساهمت في بلوغ درجات حرارة أعلى و سرعات تسخين أعلى هي على الترتيب :

1.0 cm, 4.0 cm and 1.0 cm. هذا يعني أن أبعاد العازل الحراري المحسنة هي:

تحسين أداء العازل الحراري. $(2 \times 1 \text{ cm} + 6.5 \text{ cm}) \times (2 \times 4 \text{ cm} + 6.5 \text{ cm}) \times (1.0 \text{ cm})$. الجدول 1 يلخص كل النتائج التي قادت إلى



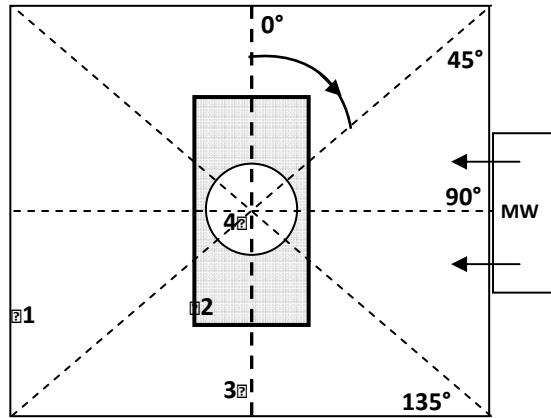
شكل 27.IV: درجة الحرارة العظمى بدلالة (a) السمك d ، (b) السمك h ، (c) السمك d'.

2.4.3-IV دراسة تأثير توجه العزل الحراري

بغية دراسة تأثير وضعية العازل الحراري داخل حجرة الميكرويف متعددة الأنماط تم توجيه أطول محور علبة العازل بزوايا مختلفة ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$) شكل 28.IV. تجدر الإشارة إلى أن هذه الدراسة تمت بعد تحسين فعالية السمك الطولي للعازل الحراري. بعد تثبيت كل زاوية توجه، تقاس درجات حرارة المنظومة (عازل حراري و سسبتور) كل 30 s و النتيجة معطاة في الشكل 29.IV. يظهر من خلال هذا الشكل انه لما تدار علبة العازل الحراري باتجاه عقارب الساعة، الذي يعتبر اتجاهها موجبا في هذه الدراسة، فان درجة الحرارة القصوى المسجلة ترتفع من القيمة 660°C إلى 727°C بين الزاوية 0° و الزاوية 135° على الترتيب. وجد أن أقصى ربح في درجة الحرارة ΔT_{\max} الحاصل من تغيير زاوية التوجه Θ يمكن استنتاجه من العبارة التالية :

$$\Delta T_{\max}(\Theta) = T_{\max}(\Theta=135^\circ) - T_{\max}(\Theta=0^\circ).$$

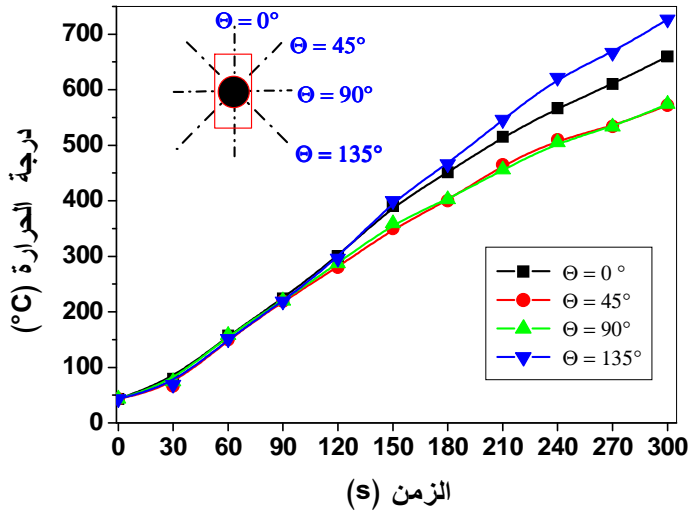
وجد أن : $\Delta T_{\max}(\Theta) = 67^\circ\text{C}$ بعد 5min من زمن المعالجة.



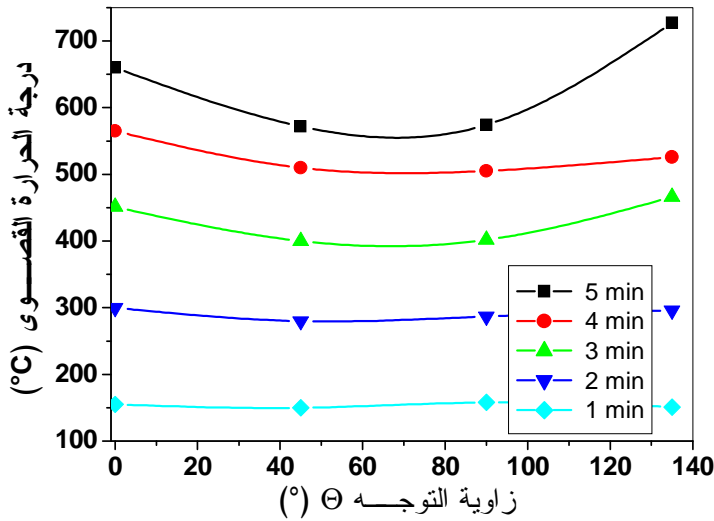
شكل 28.IV : توجه العازل الحراري: (1) حجرة الميكرويف، (2) علبة العازل، (3) المحور y، (4) مركز الحجرة.

يمثل الشكل 30.IV محاولة لشرح تغير درجات الحرارة القصوى المبلوغة بدلالة استمرارية تغير زاوية التوجه. يظهر كل منحنى من منحنيات الشكل 30.IV أن قيم درجة الحرارة تبدأ بقيمة ذروة قصوى أولى ثم تمر بقيمة ذروة دنيا لتمر مرة أخرى بقيمة ذروة قصوى ثانية. يزداد هذا التغير ليصبح أكثر وضوحا لما يمتد زمن المعالجة. عند الذروة الدنيا لمنحنى الشكل 30 يتفاعل حقل الميكرويف مع عدد كبير من

الفجوات الحرجة التي تظهر تفريرا كهربائيا. بيد أن نقاط الذروتين القصويين لنفس المنحنى تكشف أن عددا قليلا



شكل 29.IV : درجة الحرارة المقاسة بدلالة زمن المعالجة عند وضعيات مختلفة لعلبة لعازل الحراري.



شكل 30.IV : تغير درجة الحرارة القصوى بدلالة زاوية توجه العازل الحراري.

من الفجوات الحرجة قد تفاعلت مع حقل الوارد لموجات الميكرو. بعبارة أخرى يتناسب عدد الفجوات الحرجة، التي تقوم بامتصاص طاقة موجات الميكرو، عكسيا مع درجة الحرارة المقاسة لما تتغير زاوية التوجه من 0° (الذرة الأولى) إلى 135° (الذرة الثانية) مرورا بالذروة الدنيا عند الزاوية 69° ستغراد تقريبا. بالإضافة إلى ذلك فإن النتائج المحصل عليها من تحسين فعالية زاوية توجه العازل الحراري

كشفت بوضوح على وجود أثر واحد على الأقل الذي يمكن أن يكون الفجوات. هذه الفجوات تلعب دور مواضع امتصاص الميكرويف في عازل Al_2O_3 الليفي. بالتالي يمكن رد فرضية وجود أثر الشوائب الناقلة، لأن احتمال وجود الشوائب كمواضع امتصاص لا يتأثر بزاوية التوجه (تمتص الشوائب الناقلة الميكرويف بمقدار متساوي في كل الاتجاهات).

5.3-IV خلاصة

أعطت هذه الدراسة حقيقة تجريبية واضحة لوجود أثر معتبر لسمك العازل الحراري على التسخين بموجات الميكرويف داخل حجرة 2.45GHz متعددة الأنماط. تتعلق كذلك هذه الحقيق التجريبية بالأثر الملموس لتوجه العازل الحراري مع جهة ورود الميكرويف.

كما وجد أن ضياع طاقة الميكرويف، الناجم من التفريغ الكهربائي داخل فجوات معينة للعزل الحراري، يتعلق بسمك و توجه العازل الحراري داخل حجرة التسخين. إن تحسين كلا من أبعاد و توجه العازل الحراري وخاصة تلك العوازل المصنوعة من Al_2O_3 الليفي قبل الشروع في استثمار المعالجة بالميكرويف يمكن أن ينتج عنه ربح معتبر في درجة الحرارة.

تطبيقات منظومة التسخين بالميكرويف

الفصل
51. تلييد مادة الملايت ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)

باستعمال الميكرويف

1.1-V ملخص العمل المنجز

تم اختبار منظومة التسخين بنجاح في تلييد عينات من مادة الملايت الخزفية ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) عند درجات حرارة مختلفة ($1200^\circ C - 1350^\circ C$) بخطوة $50^\circ C$ لمدة دقيقة واحدة فقط من تعريض العينات للميكرويف عند كل درجة حرارة. كما تم إجراء دراسة مقارنة وذلك بتلييد العينات الأنفة الذكر في فرن تقليدي عند نفس مجال درجات الحرارة. لقد بينت النتائج أن كثافة تلييد العينات المسخنة بالميكرويف كانت أعلى بكثير مقارنة بتلك المسخنة بالطريقة التقليدية.

2.1-V مقدمة

من المعروف جدا ان الملايت النقي ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) يعتبر مادة خزفية صعبة التلييد بشكل عام في الأفران التقليدية ($>1700^\circ C$) ، ويرجع هذا إلى بطء انتشار ذرات الألمنيوم في السيلكون الموجود بالمادة. مع ذلك النجاح في تلييد مثل هذه المادة المتميزة بنقطة ذوبان عالية ($\sim 1900^\circ C$) باستعمال طاقة موجات الميكرويف سيؤدي بدون أدنى شك إلى تلييد مواد خزفية أخرى منخفضة نقاط الذوبان. لذلك فإن الهدف الأساس لهذا العمل هو وضع تحت محك الاختبار قدرة منظومة التسخين بالميكرويف المحسنة و المطورة على تلييد الخزفيات و ذلك بالمرور أولا بتلييد مادة الملايت [130].

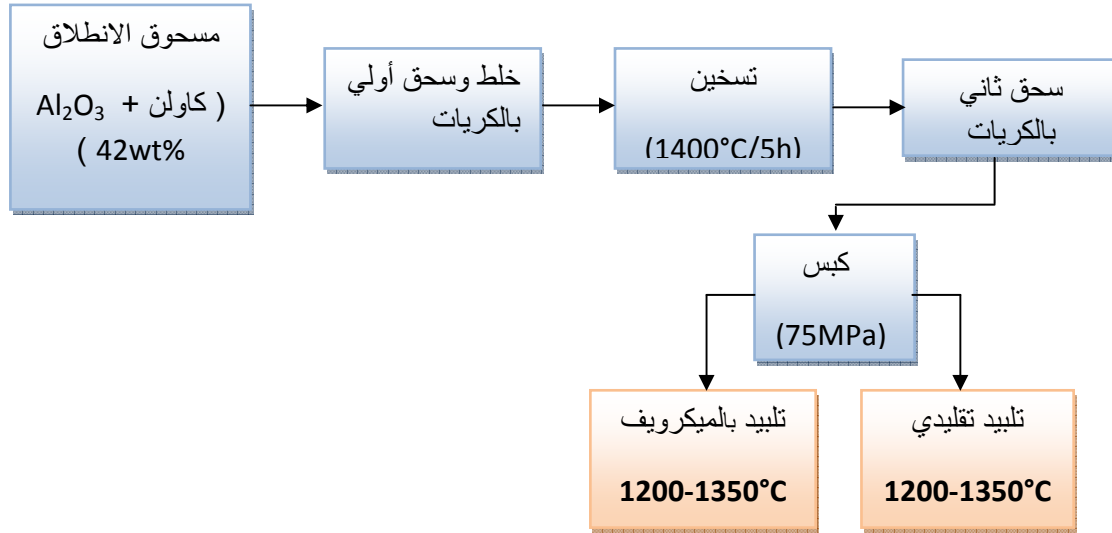
3.1-V صناعة و تلييد مادة الملايت

تم استعمال مادتي الألومينا عالية النقاوة من نوع α - و الكاولن المحلية. هذه الأخيرة تم جلبها من منشئها

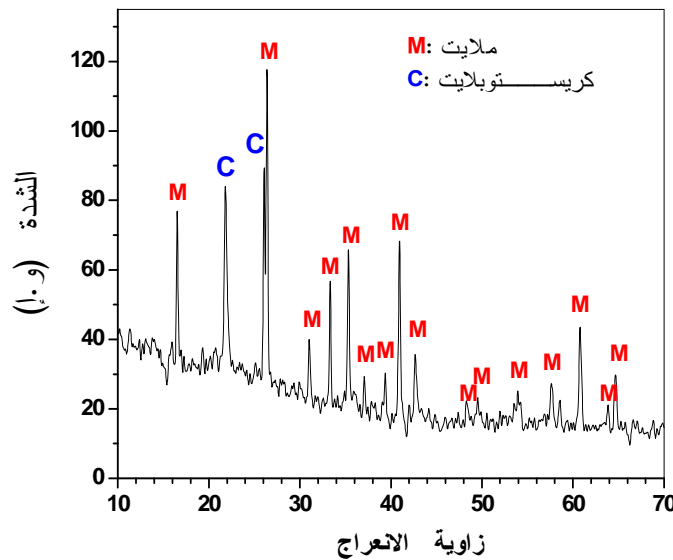
جدول 1.V : التركيب الكيميائي للكاولن المحلي

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	MnO	TiO ₂
43.39	37.27	00.64	00.38	00.06	-	-	00.41	00.09

بمنطقة جبل دباغ - قالمة و ذات تركيب كيميائي مبين في الجدول 1. تم خلط مسحوق الكاولن بحوالي 42 % وزنا من مسحوق الألومينا- α النقي. بعدها تم تسخين الخليط عند الدرجة 1400°C مدة 5 ساعات في فرن تقليدي من أجل الحصول على طور الملايت المبلور. مخطط بياني يوضح أهم الخطوات المتبعة في عملية تحضير و تلييد مادة الملايت معطى في الشكل 1.V.



شكل 1.V : مخطط توضيحي يبين الخطوات الأساسية المتبعة في تحضير مسحوق الملايت و عملية تلييد العينات عن طريق التسخين بالميكرويف و التسخين التقليدي

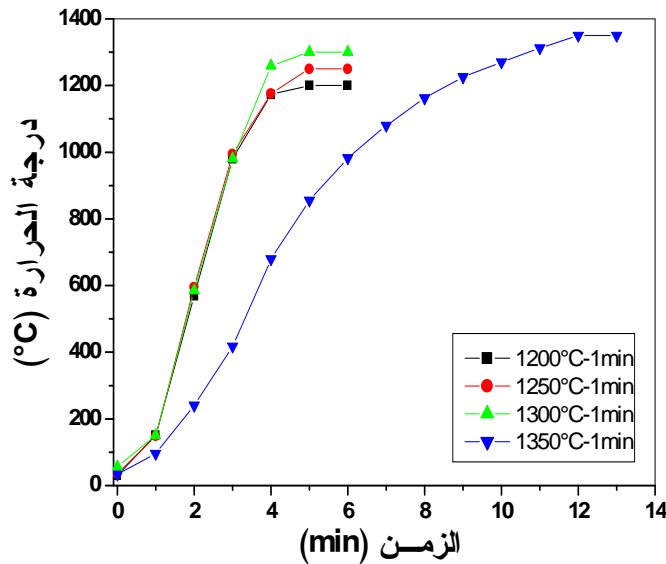


شكل 2.V : طيف انعراج أشعة x لمسحوق الملايت المحضر عند 1400°C مدة 5 ساعات.

تم إنتاج عينات اسطوانية الشكل من مسحوق الملايت المحضر بمكبس فولاذي عند الضغط 75 MPa بعدها تمت معالجتها في فرن الموجات باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف في مجال درجة الحرارة من 1200°C إلى 1350°C بخطوة 50°C. و بغية إجراء دراسة مقارنة تم تسخين عينات أخرى من المادة ذاتها في فرن تقليدي مدة 3 ساعات في نفس مجال درجة الحرارة. تم تحديد كثافة التلييد النظرية بطريقة أرخميدس و القياس المباشر لوزن و حجم العينات.

طيف انعراج أشعة X لمسحوق الملايت المحضر مبين في الشكل 2.V. تظهر أغلبية الخطوط تشكل طور الملايت المبلور (M). تشير خطوط الانعراج عند الزاويتا 22° و 26° عن وجود مقدار معين من SiO₂ الحر الذي لم يتفاعل مع الالومينا- α فتحول إلى شكل كريستوباليت (C).

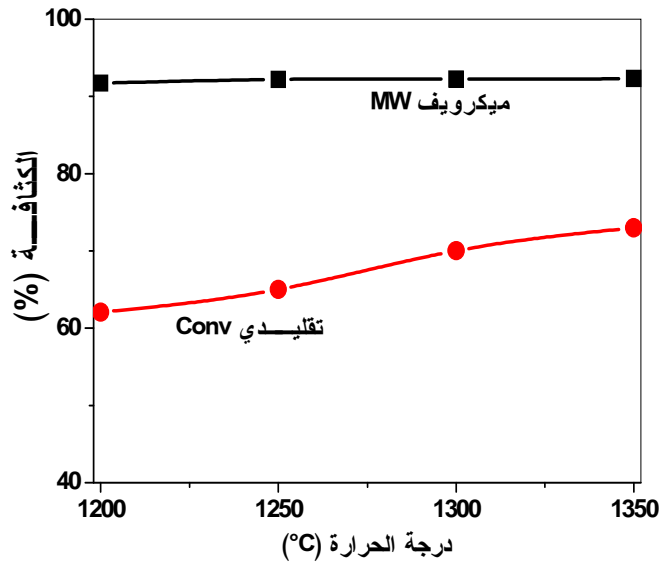
دورات التسخين لعينات الملايت باستعمال إشعاع الميكرويف مبينة في الشكل 3.V و التي تم الحصول عليها بتطبيق الاستطاعة القصوى للميكرويف (850 Watts). عند بلوغ كل درجة الحرارة يتم الإبقاء عليها مدة دقيقة واحدة. كانت مدة تعريض العينات إلى طاقة إشعاع الميكرويف تقدر بـ 5 min من أجل بلوغ الدرجات 1200°C، 1250°C و 1300°C أما بالنسبة لبلوغ العينة الدرجة 1350°C فتم تعريضها للإشعاع مدة 12 min (تعرض العازل الحراري إلى تصدع نتيجة حادث غير مقصود مما خفض من فعالية عزله للحرارة لبلوغ الدرجة 1350°C). يمكن مشاهدة نتائج تكثيف مادة الملايت في الشكل 4.



شكل 3.V: منحنيات التسخين بالميكرويف لعينات الملايت عند درجات حرارة مختلفة مدة دقيقة واحدة.

و بالتالي يمكن استنتاج سرعات التسخين المتوسطة، بطريقة الميكرويف، عند الدرجات 1200°C ، 1250°C و 1300°C كما يلي : $240^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ، $250^{\circ}\text{C}/\text{min}$ و $260^{\circ}\text{C}/\text{min}$ على الترتيب أما بالنسبة لسرعة التسخين المتوسطة لبلوغ 1350°C فكانت تقدر بحوالي $112.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

حسب الشكل 4.V فان كل المعلومات تشير بوضوح إلى أن تكثيف مادة الملايت المعالجة في حقل الميكرويف كان أعلى بكثير من نفس المادة التي تم تكثيفها بالطريقة التقليدية. حيث كانت نسبة التحسين في الكثافة النظرية المحصل عليها بالميكرويف تقدر بحوالي 30 % عند 1200°C لتنزل هذه النسبة إلى حوالي 19 % فقط عند 1350°C . من جهة أخرى يبدو منحنى التلبيد التقليدي سيقطع منحنى التلبيد بالميكرويف عند درجات الحرارة الأعلى.



شكل 4.V: الكثافة النظرية بدلالة درجة الحرارة لعينات الملايت الملبدة بطريقة الميكرويف (MW) و الطريقة التقليدية (Conv).

إن النتائج المحصل عليها تدل على وجود أثر للميكرويف لا ريب فيه في زيادة نسبة التلبيد (الكثافة النظرية) لمادة الملايت المدروسة. في الحقيقة عند ما تتجاوز درجة الحرارة القيمة 1000°C يصبح اقتران الميكرويف بالمادة قويا و بالتالي يزيد من تكثيفها.

4.1-V خلاصة

بالنظر إلى كون كثافة مادة الملاييت المحصل عليها بطريقة الميكرويف كانت أعلى من تلك المحصل عليها بالطريقة التقليدية فإن هذا العمل يكون قد أكد و اثبت حقيقة تجريبية و التي تتعلق بوجود ما اصطلح عليه الباحثين، في ميدان المعالجة بالميكرويف، باسم *اثر الميكرويف (Microwave Effect)*.

بالإضافة إلى الأزمنة القصيرة جدا التي تميزت بها طريقة الميكرويف مقارنة بالطريقة التقليدية خاصة زمن المكوث عند درجة حرارة المعالجة (1 min. و ! 3 hrs) فإنه تم تقليص زمن المعالجة و بالتالي ادخار معتبر في الطاقة و هذا سيكون له ضرر اقل على البيئة. هذا الضرر ناتج من حرق الوقود اللازم لتوليد الكهرباء المشغلة للأفران. بناءا على ذلك فإنه يمكن التفاؤل بأن نجاح عملية تلييد مادة الملاييت باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف المطورة سيقود حتما إلى تلييد مواد خزفية أخرى خاصة تلك التي تملك نقاط ذوبان منخفضة. و بكلمة موجزة فإن الهدف من هذا العمل تم بلوغه بنجاح.

2. تلييد مادة العظم (H.A- Hydroxyapatite)

باستعمال الميكرويف

1.2-V ملخص العمل المنجز

تم في هذا الجزء من التطبيقات تلييد مادة HA القادمة من عظام البقر بتطبيق التسخين بالميكرويف. تم الحصول على الـ HA بكلسنة العظم في فرن تقليدي عند 800°C مدة 4 ساعات متبوعا بسحق جيد بالكريات بوجود الماء. ثم شكلت عينات بكبس المسحوق تحت ضغط 75 MPa ولبدت مدة 15 min . باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف، التي تم تطويرها في هذه الدراسة، في مجال درجة الحرارة بين 950°C و 1200°C . أجريت دراسة مقارنة بتلييد عينات الـ HA بالطريقة التقليدية في نفس مجال درجة الحرارة. تميزت العينات الملبدة بطريقة الميكرويف بنسبة تلييد عالية نسبيا مقارنة بمثلتها الملبدة بالطريقة التقليدية. حيث، على سبيل المثال، أعطت قياسات الكثافة النظرية للعينات الملبدة بالميكرويف عند الدرجة 1050°C القيمة 94.25% في حين لم تعطي الطريقة التقليدية عند نفس درجة الحرارة سوى 68.19% من القيمة النظرية.

2.2-V مقدمة

إن أهمية دراسة مادة الهيدروكسي - اباتايت ($\text{HA: Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) تكمن في مماثلتها للمكونات الأساسية الموجودة في العظام عموما و الأسنان على الخصوص [131]. توجد عموما طريقتان متبعتان في إنتاج مادة الـ HA الأولى هي الطريقة التركيبية [132-137] و الثانية هي إنتاجها من العظم الطبيعي [138-141]. تعتبر مادة الـ HA كخزفية عضوية تتطلب درجة حرارة مرتفعة و أزمنة معالجة طويلة في الأفران التقليدية و بالتالي تكلفة عالية نسبيا في إنتاجها. يهدف هذا القسم من البحث إلى تلييد مادة الـ HA المستخلصة من عظم الأبقار بطريقة أقل تكلفة من وجهة نظر طاوقية و أقصر مدة ممكنة وذلك باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف المطورة في المختبر.

التركيب الكيميائي لمادة العظم معطى في الجدول 1 حيث تم تحليل المكونات العنصرية للمادة المذكورة باستعمال مطياف ICP-OES. يمكن ملاحظة تواجد العديد من العناصر كـ Sr, Mg, Na و Fe معا كمكونات أقلية في المسحوق المكلسن. هذا يدل على أن الـ HA الناتج من عظم البقر المدروس غير نقي.

جدول 2.V : المكونات الكيميائية لمادة العظم المكلس عند 800°C مدة 4 ساعات.

wt%	Ca	P	Na	Mg	Sr
عظم مكلس	37.0±0.6	17.6±0.3	0.781	0.705	0.042

wt%	Zn	Fe	Si	K	Molar (Ca /P)
عظم مكلس	0.006	0.050	0.002	0.069	1.63±0.005

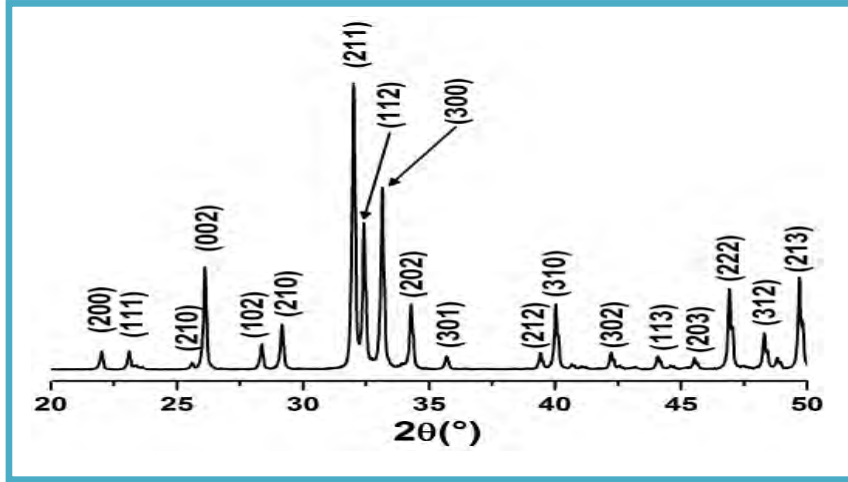
3.2-V الطريقة التجريبية

1- تحضير وصناعة مادة الـ HA: تم إنتاج مسحوق الـ HA بكلسنة عظم البقر عند 800°C مدة 4 ساعات متبوعا بسحق رطب بالكريات. بعدها تم تشكيل عينات بضغط المسحوق في مكبس فولاذي تحت القيمة 75 MPa. ومن اجل دراسة تأثير درجة حرارة التليد على الكثافة النسبية لمادة الـ HA تم تليد العينات المضغوطة عند مجال درجة الحرارة المحصور بين 950°C و 1200°C بخطوة 50°C. حيث تمت عملية تليد العينات في منظومة التسخين بالميكرويف (الشكل 5.V) مدة 15min فقط أما التليد التقليدي، الذي تم تطبيقه على نفس العينات لغرض المقارنة، فكان لمدة 120 min. تم تحديد قيمة الكثافة النظرية بالقياس المباشر لكتلة و حجم العينات باستعمال ميزان الكتروني و أداة قياس ميكرومترية.



شكل 5.V: الأجزاء الأساسية لمنظومة التسخين بالميكرويف المستعملة في تليد عينات الـ HA في المركز.

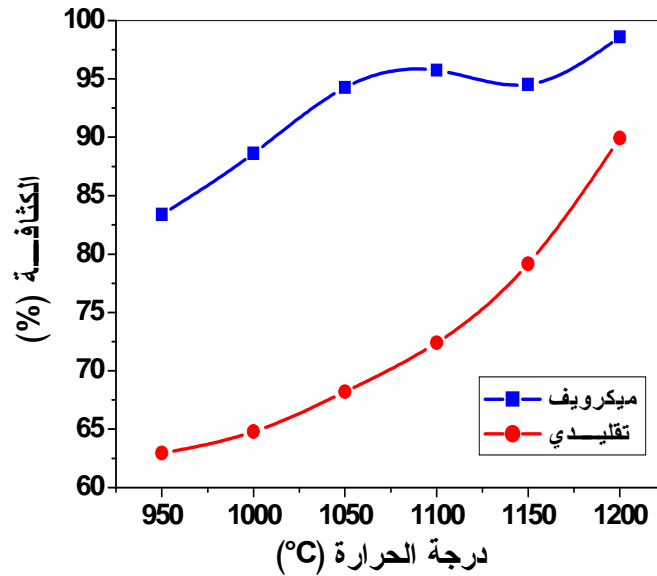
يبين طيف انعراج أشعة x للمسحوق المكلسن أنه مبلور بشكل جيد (شكل 6.V). فهو يؤكد من جهة أخرى أن طور الـ HA (H.A: Hydroxyapatite) هو الطور الوحيد الموجود في مادة العظم المكلسن [142,104].



شكل 6.V : طيف انعراج أشعة x لمادة العظم المكلسن عند 800°C مدة 4 ساعات.

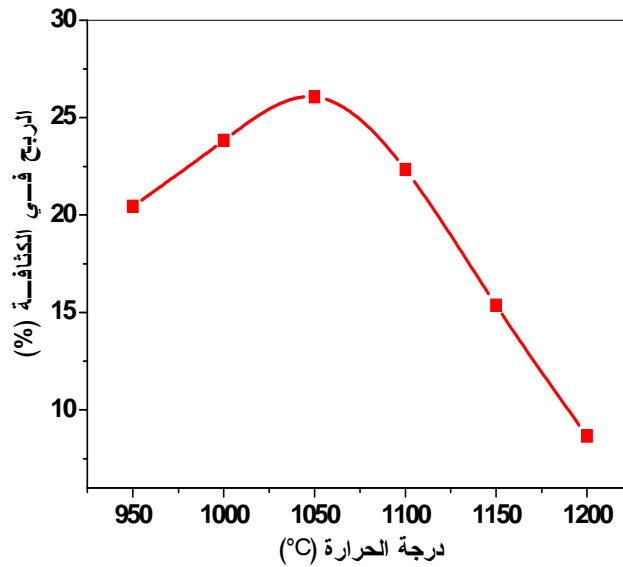
4.2-V نتائج التلييد

يبين الشكل 3 تغير نسبة التلييد (الكثافة) المقاسة عند مختلف درجات الحرارة باستعمال طريقة الميكرويف و الطريقة التقليدية. يظهر الشكل 7.V كما هو منتظرا زيادة في الكثافة مع درجة حرارة التلييد في كلا من الطريقتين المعتمدتين.



شكل 7.V : منحنيات نسبة تلييد RD لمادة العظم بدلالة درجة الحرارة T بطريقتي التسخين بالميكرويف (MW) و التسخين التقليدي (Conv.).

إلا أن منحنى الناتج عن التسخين بالميكرويف يعلو بشكل واضح منحنى الناتج عن التسخين التقليدي وهذا على كامل مجال درجة الحرارة من 950°C إلى 1200°C . هذا إن دل على شيء فإنما يدل على أن طريقة الميكرويف أعطت تلييدا أفضل لعينات الـ HA من الطريقة التقليدية ليس فقط من حيث القيم المقاسة بل حتى من حيث المدة الزمنية التي كانت أقصر. حيث، على سبيل المثال، أعطت قياسات الكثافة النظرية للعينات الملبدة بالميكرويف عند الدرجة 1050°C مدة 15 min فقط القيمة % 94.25 في حين لم تعطي الطريقة التقليدية عند نفس درجة الحرارة سوى % 68.19 من القيمة النظرية رغم تطبيق زمن تلييد أطول! (120 min). و بذلك تكون طاقة الميكرويف وراء ربح معتبر في الكثافة النظرية يقدر قيمته العظمى بحوالي % 26 مقارنة بالتسخين التقليدي (شكل 8.V). إن نجاح تلييد مادة الـ HA باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف أمام التلييد التقليدي يعتبر بمثابة نجاح آخر يضاف إلى النجاح الذي تم تحقيقه سابقا مع تلييد مادة الملايت.



شكل 8.V: الربح في كثافة التلييد بدلالة درجة الحرارة الناتج من تطبيق الميكرويف.

5.3-V خلاصة

نجحت منظومة التسخين بالميكرويف التي تم تطويرها في هذه الدراسة في تكثيف مسحوق الـ HA المكلسن و الناتج من العظام الطبيعية للأبقار حيث تم تسجيل ربح في نسبة التكتيف يقدر بـ % 26 مقارنة بالتكتيف الذي يعتمد على الأفران التقليدية كما تم تسجيل ربحا في مدة المعالجة يقدر على الأقل بـ 105 min. و هذا يعكس كمية معتبرة من الطاقة التي يمكن ادخارها إذا ما تقرر استعمال منظومة الميكرويف في المعالجة الحرارية للمواد.

3. تلييد مادة الديوبسايت (Diopside) باستعمال الميكرويف

1.3-V ملخص العمل المنجز

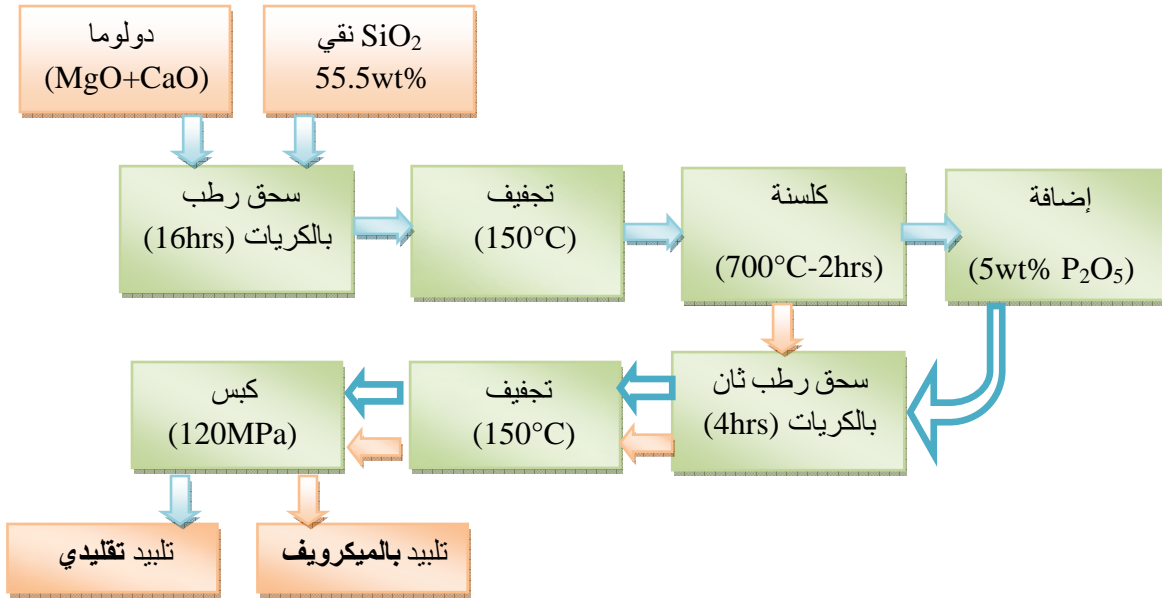
في هذا التطبيق الثالث تم صناعة مادة الديوبسايت ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) بدون أية إضافة باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف. تم الحصول على كثافة نسبية وصلت إلى % 96 من الكثافة النظرية عندما لبدت عينات الديوبسايت عند درجة الحرارة 1125°C مدة 15 min. تم الحصول على نفس هذه القيمة للكثافة النظرية عندما لبدت عينات من الديوبسايت أضيف لها % 5 من P_2O_5 عند الدرجة 1250°C في فرن تقليدي مدة 120min.

2.3-V مقدمة

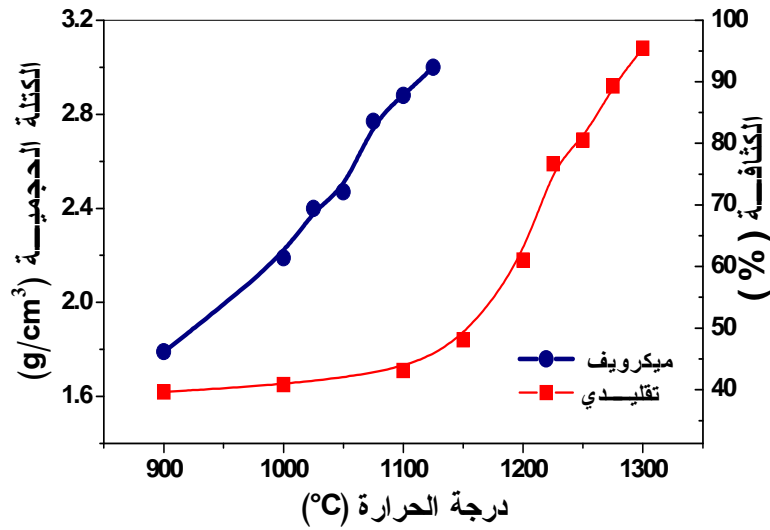
يقبل جسم الإنسان بشكل جيد مادة الديوبسايت ذات التركيبة الكيميائية ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) بدون مضاعفات أو أعراض جانبية. كنتيجة لذلك يمكن استعمال هذه المادة في مكان العظم المحضر اصطناعيا لأنها تشكل حدا حقيقيا (طبيعيا) مع نسيج العظم المحيط عند زرعها [143، 144]. يهدف هذا العمل، كسابقه، إلى التحقق من تأثير المعالجة الحرارية بالميكرويف على تكثيف المواد بشكل عام و الديوبسايت بشكل خاص.

3.3-V الطرق التجريبية

تم تحضير مادة الديوبسايت بوزن كميات محددة من الـ SiO_2 النقي و مسحوق الدولوما (CaO.MgO). يظهر الشكل 9.V أهم الخطوات المتبعة في تحضير العينات. تم الحصول على الدولوما من حجر الدولوميت بعد كلستها عند 900°C مدة 4 hrs. كانت نقاوة الدولوما حوالي % 99.6 حيث حوت أساسا على الشوائب ذات النسب التالية : % 0.27 من Fe_2O_3 و % 0.07 من Al_2O_3 و % 0.02 من Na_2O . التلييد بالميكرويف تم في الهواء عند تردد الموجات 2.45GHz باستطاعة خروج 850W وذلك باستعمال فرن ميكرويف تجاري معدل [145، 104] من نوع (Model LG MC-805 AR) و الذي تم تزويده بمنظومة التسخين المطورة في هذه الدراسة. اما التلييد التقليدي فتم في فرن كهربائي Nabertherm من نوع (Model Kanthalapm). الكثافة النظرية تم قياسها باستعمال طريقة إزاحة الماء لأرخميدس [146].



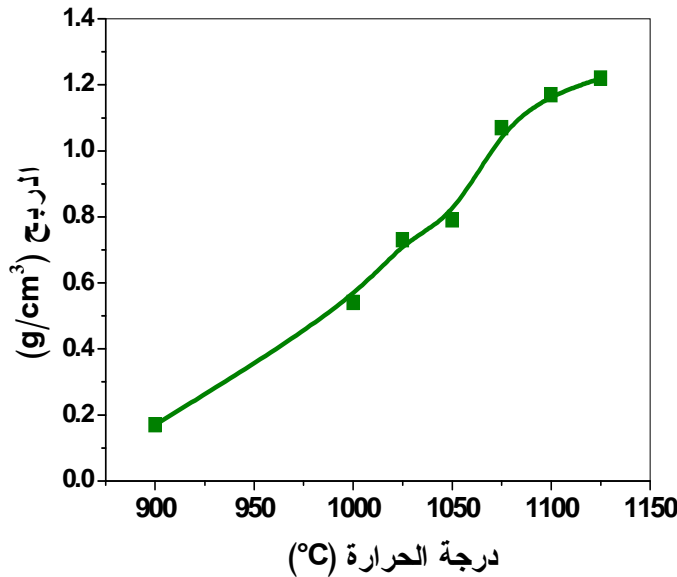
شكل 9.V : مخطط توضيحي لأهم الخطوات المستعملة في تحضير مادة الديوبسايت و تلييدها استعمال كلا من التسخين بالميكرويف و التسخين التقليدي.



شكل 10.V : تلييد عينات الديوبسايت بدون إضافة باستعمال التسخين بالميكرويف (MW) و باستعمال التسخين التقليدي (Conv.) لنفس العينات بإضافة 5 wt% من P2O5 عند درجات حرارة مختلفة.

4.3-V نتائج التلييد

يظهر الشكل 10.V نسبة التلييد الخاصة بعينات الديوبسايت باستعمال التسخين بالميكرويف لمدة 15min عند مجال درجات الحرارة المحصور بين 900°C و 1125°C . و بغية إجراء دراسة مقارنة فقد تم رسم على نفس الشكل 11.V منحنى نسبة التلييد المحصل عليه بالطريقة التقليدية لمدة 120 min في مجال درجات الحرارة بين 900°C و 1300°C . ففي حالة التلييد التقليدي تم الحصول على 55% فقط من الكثافة النظرية عند 1100°C لمدة معالجة تقدر بـ 120min. بالمقابل تم بلوغ بل تجاوز مستوى 93% من الكثافة النظرية عند 1100°C في مدة 15 min باستعمال الميكرويف. كما يمكن ملاحظة أيضا انه كلما زادت درجة الحرارة كلما كانت نسبة التلييد (الكثافة النظرية) المحصل عليها بطريقة الميكرويف أعلى منها في الطريقة التقليدية. هذا يوحي بأن نسبة التكتيف تتبع آلية أسرع و أكثر فعالية في عملية التلييد بالميكرويف منها في التلييد التقليدي. فعلى سبيل المثال تم الحصول على أعلى كثافة نظرية (96%~) للديوبسايت لما أضيفت 5wt% من P_2O_5 و الملبد عند 1250°C لمدة 120 min باستعمال الطريقة التقليدية، في حين تم بلوغ هذا المستوى من الكثافة لما لبدت عينات من الديوبسايت بدون أية إضافة عند 1125°C مدة 15 min باستعمال منظومة التسخين بالميكرويف. و لما كان التلييد بالميكرويف يأخذ مدة زمنية أقصر (أقل من 10 % من زمن التلييد التقليدي) فانه يمكن أن إقتراح، علاوة على ذلك، أن نسبة التكتيف في عملية التلييد بالميكرويف كان أعلى بكثير منه في عملية التلييد التقليدية [147].



شكل 11.V: الزيادة في الكثافة المحصل عليها بطريقة الميكرويف عند درجات حرارة مختلفة.

يمكن الحصول على مقدار الزيادة في الكثافة التي تم ربحها باستعمال منظومة الميكرويف بطرح قيمة الكثافة التقليدية من الكثافة الناتجة بطريقة الميكرويف على مجال درجات حرارة التلييد المشترك (-900°C) (1125°C). النتيجة مبينة في منحنى الشكل 11.V. يظهر جليا من هذا المنحنى أنه كلما زادت درجة حرارة التلييد كلما كبر معه الفرق بين الكثافتين مشيرا بذلك إلى تفوق التكتيف بالميكرويف.

5.3-V الخلاصة

نجحت منظومة الميكرويف المطورة وللمرة الثالثة على التوالي في عملية التكتيف. حيث عنيت هذه المرة بمادة أخرى وهي الديوبسايت المصنفة ضمن الخزفيات العضوية لتأقلمها الجيد مع الجسم البشري عند زراعتها فيه. إذ لم تكتفي منظومة الميكرويف بتلييد المادة المذكورة بنسب أعلى فحسب (96% ~) بل تعدت هذا المستوى إلى مستوى صناعتها بالفعل انطلاقا من المواد الأساسية الداخلة في تركيبها (CaO.MgO) و (SiO₂).

الخلاصة

قمنا من خلال هذا البحث بتطوير منظومة تسخين تعمل بالميكرويف عند التردد **2.45 GHz**. ارتكزت عملية التطوير أساسا على أربعة محاور:

- ❖ المحور الأول اشتمل على توسيع حجم عنصر التسخين بالميكرويف ليسمح باستيعاب عينات خزفية ذات قطر أكبر من **13 mm** يسهل إجراء القياسات عليها بعد معالجتها
- ❖ المحور الثاني اشتمل على تطوير نظاما للعزل الحراري من الألومينا الليفي **Al₂O₃ fibre** ذو هندسة ذات بطانة مزدوجة يتميز بسهولة تركيبه و بقدرة عالية على مقاومة الإجهاد الحراري
- ❖ المحور الثالث يكمن في تصميم و تطوير نظاما للتحكم في درجة الحرارة يمكن برمجته بإدخال درجة الحرارة المعالجة و زمن المكوث و كذلك سرعة التسخين. مبداه يكمن في فتح و غلق دارة التغذية للمغنترون بواسطة موصل ستاتيكي صلب ذو استطاعة عالية بوجود قاسم للتوتر عبارة عن محول كهربائي و مكثفة توتر عالي.
- ❖ المحور الرابع اشتمل على تركيب نظاما خارجيا للتبريد مدعما لنظام التبريد الداخلي هدفه منع مغنترون فرن الميكرويف المعدل من بلوغ درجة حرارة حرجة تتسبب غالبا في توقيف اشتغاله و حتى إتلافه. سمح نظام التبريد بتمديد أزمانة المعالجة من **5 min** إلى حدود **20 min** عند مجال درجات الحرارة العالية (**1000°C - 1650°C**).

تم دراسة تأثير توزيع الحقل الكهرومغناطيسي داخل مطبق متعدد الأنماط لفرن الميكرويف باستعمال منظومة التسخين المطورة حيث تم اكتشاف طريقة لتركيز حقل موجات الميكرويف في مركز عنصر التسخين و بذلك جعل التسخين أكثر فعالية. اعتمدت الطريقة على إقحام اسطوانة معدنية مجوفة ذات نصف قطر يساوي أو يقارب طول موجة الميكرويف العاملة المقدر بـ **12 cm** ومحورها منطبق تماما على محور حجرة الفرن.

كما أجرت دراسة تجريبية أخرى على مدى تأثير كلا من سمك و توجه العازل الحراري المطور على التسخين بالميكرويف. حيث سمحت الدراسة بتحديد الأبعاد الثلاث و التوجه الأمثل للعازل الحراري الذي يعطي أعلى مردود في التسخين.

تم استثمار منظومة الميكرويف المطورة في المعالجة الحرارية لثلاث أنواع من الخزفيات وهي مادة الملايت (Mulite) و مادة العظم (hydroxiapatite) و مادة الديوبسايت (Diopside). قورنت نتائج تلييد المواد السابقة مع التلييد الكلاسيكي لنفس المواد فوجدت أنها أفضل بكثير سواء من حيث مدة المعالجة التي كانت أقصر أو من حيث درجة حرارة المعالجة التي كانت أخفض و هذا باستعمال طريقة الميكرويف المقترحة في هذه الدراسة.

الكلمات المفتاحية : ميكرويف، سسبتور، عنصر التسخين بالميكرويف، سمك، توجه، العازل الحراري، الملايت، العظم، الديوبسايت.

المراجع

- [1] Thostenson E.T., Chou T.-W. Composites: Part A 30, 1055–1071(1999).
- [2] Siores E, DoRego D. Journal of Materials Processing Technology, 48(12):619–625(1995).
- [3] Marand E, Baker HR, Graybeal JD. Macromolecules.,25:2243–2252(1992).
- [4] Janney MA, Kimrey HD. Materials Research Society, pp. 215–227(1991).
- [5] Sutton WH, Brooks MH, Chabinsky IJ, editors. Materials Research Society Proceedings, Vol. 124, Pittsburgh: Materials Research Society, (1988).
- [6] Snyder WB, Jr., Sutton WH, Iskander MF, Johnson DL, editors. Materials Research Society Proceedings, Vol. 189, Pittsburgh: Materials Research Society, (1991).
- [7] Beatty RL, Iskander MF, Sutton WH, editors. Materials Research Society Proceedings, Vol. 269, Pittsburgh: Materials Research Society, (1992).
- [8] Iskander MF, Lauf RJ, Sutton WH, editors. Materials Research Society Proceedings, Vol. 347, Pittsburgh: Materials Research Society, (1994).
- [9] Iskander MF, Kiggans JO, Bolomey J-C, editors. Materials Research Society Proceedings, Vol. 189, Pittsburgh: Materials Research Society, (1996).
- [10] Clark DE, Gac FD, Sutton WH, editors. ceramic transactions, Vol. 21, Westerville, OH: American Ceramic Society, (1991).
- [11] Clark DE, Tinga WR, Laia JR, Jr, editors. ceramic transactions, Vol. 36, Westerville, OH: American Ceramic Society, (1993).
- [12] Clark DE, Folz DC, Oda SJ, Silbergliitt RJ, editors. ceramic transactions, Vol. 59, Westerville, OH: American Ceramic Society, (1995).
- [13] Clark DE, Sutton WH, Lewis DA, editors. ceramic transactions, Vol. 80, Westerville, OH: American Ceramic Society, (1997).
- [14] Lauf RJ, Bible DW, Johnson AC, Everliegh CA. Microwave Journal, 36(11):24–27(1993).
- [15] Kitagawa K, Kanuma Y. Journal of Microwave Power, 21(13):149–158(1986).
- [16] Gerling JE. Journal of Microwave Power, 22(3):149–158(1987).
- [17] Veley VV. Modern Microwave Technology. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1987).
- [18] Everleigh CA, Johnson AC, Espinoza RJ, Garard RS. Materials Research Society, pp. 79–89(1994).
- [19] Palaith D, Silbergliitt R. American Ceramic Society Bulletin, 69(9):1601–1606(1989).
- [20] Palaith D, Silbergliitt R, Wu CCM, Kleiner R, Libelo EL. Materials Research Society,

- pp. 255–266(1988).
- [21] Tinga WR, Xu JD, Vermeulen FE. The American Ceramic Society, pp. 347–355(1995).
- [22] Wei J, Hawley MC, DeLong JD. Polymer Engineering and Science, 33(17):1132–1140(1993).
- [23] Lewis DA, Summers JD, Ward TC, McGrath JE. Journal of Polymer Science Part A ,30(8):1647–1653(1992).
- [24] Wei J, Delgado R, Hawley MC, DeMuse MT. Materials Research Society, pp. 735–741(1994).
- [25] Ramakrishna D, Travis S, Hawley MC. Materials Research Society, pp. 431–438(1992).
- [26] Qui Y, Hawley MC. Proceedings of the 13th annual technical conference of the Baltimore. American Society for Composites, (1998).
- [27] Ghaffariyan SR, Methven JM. Materials Research Society, pp. 135–140(1991).
- [28] Vogt GJ, Unruh WP. Materials Research Society, pp. 245–250(1992).
- [29] Vogt GJ, Regan AJ, Rohlev AS, Curtin MT. The American Ceramic Society, pp. 125–132(1995).
- [30] Metaxas AC. The American Ceramic Society, pp. 549–562(1993).
- [31] Collin RE. Foundations for microwave engineering. New York: McGraw-Hill, (1966).
- [32] Kimrey HD, Janney MA. Materials Research Society, pp. 367–372(1988).
- [33] Risman PO, Ohlsson T, Wass B. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy , 22(3):193–198(1987).
- [34] Tran VN. The American Ceramic Society, pp. 683–692(1991).
- [35] Janney MA, Calhoun CL, Kimrey HD. Journal of the American Ceramic Society ,75(2):314–346(1992).
- [36] Arindam D, Ahmad I, Whitney ED, Clark DE. Materials Research Society, pp. 283–288(1991).
- [37] Demuse MT, Johnson AC. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 723–727(1994).
- [38] Surret AD, Lauf RJ, Paulauskas FL, Johnson AC. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 691–696(1994).
- [39] Johnson AC, Lauf RJ, Surret AD. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 453–458(1994).
- [40] Mijovic J, Wijaya J. Polymer Composites, 11(3):184–190(1990).
- [41] Chen M, Siochi EJ, Ward TC, McGrath JE. Polymer Engineering and Science , 33(7):1092–1109(1993).

- [42] Daniel VV. Dielectric relaxation. New York: Academic Press, (1967).
- [43] Roussy G, Pierce JA. Foundations and industrial applications of microwave and radio frequency fields. New York: Wiley, (1995).
- [44] Ferry JD. Viscoelastic properties of polymers. New York: Wiley, (1980).
- [45] Sutton WH. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 3(1992).
- [46] Thomas RE, Sosa AJ. The Analysis and Design of Linear Circuits. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, (1994).
- [47] Carpenter JA. Jr. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 477–487(1991).
- [48] Tinga WR. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 505–516(1992).
- [49] Guillon P. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 79–89(1994).
- [50] Al-Assafi S, Clark DE. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 340–355(1992).
- [51] Vollath D, Varma R, Sikafus KE. Pittsburgh: Materials Research Society, 1992. pp. 379–84.
- [52] Sutton WH. Ceramic Bulletin, 68(2):376–384(1989).
- [53] Brandon JR, Samuels J, Hodgkins WR. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 237–243(1992).
- [54] Patterson MCL, Kimber RM, Apte PS. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 301–309(1992).
- [55] Jiping Cheng, D. Agrawal, Yunjin Zhang, R. Roy, ceramics Journal of Material Science Letters, 20, 77– 79(2001).
- [56] Cheng J., Agrawal D., Zhang Y., Roy R., Materials Letters, 56, 587–592(2002).
- [57] Yadoji, P.R., Peelamedu, R., Agrawal, D., Roy, R. Mater. Sci. Eng. B98, 269–278(2003).
- [58] Mizuno, M., Obata, S., Takayama, S., Ito, S., Kato, N., Hirai, T., Sato, M., J. Eur. Ceram. Soc. 24, 387–391(2004).
- [59] Tsay, C.Y., Liu, K.S., Lin, I.N., J. Eur. Ceram. Soc. 24, 1057–1061(2004).
- [60] M. Hirota, M.C. Valecillos, M.E. Brito, K. Hirota, M. Toriyama, J. Eur. Ceram. Soc., 24 3337–3343(2004).
- [61] Fang Y., Cheng J., Agrawal D. K., Materials Letters, 58 498– 501(2004).
- [62] Clark D.E., Folz D., Folgar C., Mahmoud M., ACerS Pub., Westerville, OH, USA, pp.22–27(2005).
- [63] Hoshizuki H., Mitsudo S., Saji T., Matsuura K., Idehara T., Glyavin M., Ereemeev A., Honda T., Iwai Y., Nishi H., Kitano A. and J. Ishibashi, Int. J. Infrared Millimetre Waves, **26** [11]1531-41 (2005).
- [64] Kim, E. S., Kim, S. H. and Lee, B. I., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **26**, 2101– 2104(2006).

- [65] Kim, M. H., Jeong, Y. H., Nahm, S., Kim, H. T. and Lee, H. J., *J. Eur. Ceram. Soc.*, **26**, 2139–2142(2006).
- [66] Panda S.S., Singh V., Upadhyaya A., and D. Agrawal. *Metallurgical and Material Transactionsa*, VOLUME 37A, JULY 2253(2006).
- [67] J.Wang, J. Binner, B. Vaidhyanathan, N. Joomun, J. Kilner, G. Dimitrakis, T.E. Cross. *J. Am. Ceram. Soc.* 89 1977(2006).
- [68] Vallance, S. R., Kingman, S. and Gregory, D. H., *Adv Mater.*, **19**, 138–142(2007).
- [69] Vallance, S. R., Kingman, S. and Gregory, D. H., *Chem Commun.*, , 742–744(2007).
- [70] Liedtke V., Olivares I.H., Langer M., Haruvy Y.F., *J. Eur. Ceram. Soc.* 27 (2–3) 1493–1502(2007).
- [71] Huang S.G., L. Li, B.O. Van der, J. Vleugels, *J. Eur. Ceram. Soc.* 27 (2–3) 689–693(2007).
- [72] Zhang, Q.-L., et al., *J. Eur. Ceram.Soc.* (2007).
- [73] Binner J., Wang J., Vaidhyanathan B., Joomun N., Kilner J., Dimitrakis G., Cross T.E., *J. Am. Ceram. Soc.* 90, 2693(2007).
- [74] Fang C. Y., Randal C. A., Lanagan M.T., Agrawal D. K., *J. Electroceram.*, 9441-2(2008).
- [75] Agrawal D., Cheng J., Peng H., Hurt L. and Kuruvilla Cherian, *Am. Ceram. Soc. Bull.* Vol. 87, No. 3, 39-44(2008).
- [76] Wang J., Binner J., Pang Y., Vaidhyanathan B., *Thin Solid Films* 516, 5996–6001(2008).
- [77] Goldstein A., Ruginets R., Geifman L., *Ceram. Int.*, **35** 1297-1300 (2009).
- [78] Huanga Z., Gotohb M., Hiroseb Y., *J. Mater. Process. Technol.*, 209 2446-52 (2009).
- [79] Chou S.Y., Lo S.L., Hsieh C.H., Chen C.L., *J. Haz.Mater.* 163, 357–362(2009).
- [80] West, C.P., et al., *J. Eur. Ceram. Soc.* (2009).
- [81] Zheng X., Du Y., Xiao J., Lu Y., Liang C., *Mater. Sci. Eng. A*, 505, 187–190(2009).
- [82] Makul N., Agrawal D. K., *Mater. Lett.*, **64**, 367–370 (2010).
- [83] Vollmer M., *Phys. Educ.* 39 (1) 74-81(2004).
- [84] Cheng J, Qui J, Zhou J, Ye N. Pittsburgh: Mater. Res. Soc., pp. 323–328(1992).
- [85] Patterson MCL, Kimber RM, Apte PS. Pittsburgh: Mater. Res. Soc., pp. 257–266(1991).
- [86] Willert-Porada M. *Am. Ceram. Soc.*, 1997. pp. 153–163.
- [87] Calame JP, Rybakov K, Carmel Y, Gershon D. *Am. Ceram. Soc.* pp.135–142(1997).
- [88] Evans JW, Gupta D. Pittsburgh: Materials Research Society, pp. 257–266(1991).
- [89] Morell JI, Economou DJ, Amundson NR. *J. Mater. Res.*, 7(9): 2447–2457(1992).
- [90] Ting J-M, Lagounov AG, Lake ML. *J. Mater. Sci. Lett.*, 15(4): 350–352(1996).

- [91] Currier RP, Devlin DJ. Am. Ceram. Soc, pp. 387–396(1993).
- [92] Buckley J, Bryant R, Long M, Buchman A, Gleason JR., Am. Ceram. Soc, pp. 499–506(1997).
- [93] Shan THA, Cozzens R, Tian Y, Ahmad I. Materials Research Society Proceedings, San Francisco, 347, pp. 729–734(1994).
- [94] Carlton J. Gallawa <http://www.gallawa.com/microtech/Ch7Pg1.html> (2009).
- [95] [Carlton J. Gallawa](http://www.gallawa.com/microtech/author.html) <http://www.gallawa.com/microtech/author.html> (2009).
- [96] Carlton J. Gallawa <http://www.gallawa.com/microtech/Ch3.html> (2009).
- [97] Brodeur P., The Zapping of America, (Norton, 1977) p. 15.
- [98] Brodeur P., The Zapping of America, (Norton, 1977) p. 308.
- [99] AWAKE Magazine 3/22/81 (pp. 13-15), 4/22/81 (pp. 12-15), and 5/22/81 (pp. 27-28) issues of AWAKE (1981).
- [100] Rigaud J., La céramique de A à Z, Matière Intéressant Les Céramiques & Les Matériaux Minéraux, p39(1991).
- [101] Nallet F., ‘SiC pour l’électronique de puissance du future’, Technique de l’Ingénieur RE3 p1-11 (2002).
- [102] Le Carbure de Silicium System plus pp 25 ,(1999).
- [103] <http://www.techno-science.net>
- [104] Karboua N., “Realization of high temperature heating system using a domestic microwave oven 2.45 GHz”, Magister Thesis, Mentouri University, Constantine, Algeria (2004).
- [105] Katz, J. D. and Blake, R. D. Am. Ceram. Soc. Bull., 70(81), 1304-1307, (1991).
- [106] www.smart2000.pageperso-orange.fr/regulation_four (2005).
- [107] www.gefran.com.
- [108] www.crydom.com (2009).
- [109] Karboua N., A. Harabi, and S. Achour. *CIMA’04 Boumerdès (Algerie)* 30-XI/ 2-XII-(2004).
- [110] www.gallawa.com/microtech/ (2006).
- [111] Sutton W.S., Ceram. Bull., 68, 376-386(1989).
- [112] Kitiwan M., Jiamsirilers S., and Atong D., Proceeding of The 4th International Conference on Science, Technology and Application of Sintering, Grenoble, France, 134-138(2005).
- [113] Pert E., Carmel Y., Birnboim A., Olorunyolemi T., Gershon D., Calame J., Lloyd I. K. and Wilson Jr. O. C., J. Am. Ceram. Soc., 84 [9] 1981-86(2001).
- [114] Karboua N., Harabi A. and Achour S., International Conference on Physics and application CIPA, Oran 08-10/ 11(2003).

- [115] Karboua N., Harabi A. and Achour S., 3rd International Conference on Material Science Engineering CISGM'3., Jijel 25-27/ 05(2004).
- [116] Janney M. A., Calhoun C. L., and Kimrey H. D., *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**, 341-46(1992).
- [117] James C. R., Tinga W. R. and Voss W. A. G., Energy Conversion in Closed Microwave Cavities, *Microwave Power Engineering*, Vol. 2. Edited by Okress E. C. Academic Press. New York,(1973).
- [118] www.linmic.com
- [119] Lauf R. J., Bible D. W., Johnson A. C., *Microwave Journal* , 36 (11):24–27(1993).
- [120] Xu G., Olorunyolemi T., Carmel Y., ILloyed. K., and Wilson Jr O. C., J., *Am. Ceram. Soc.*, **86** [12] 2082-86(2003).
- [121] Sutton W. H., *Ceram. Bull.*, **68** [2] 376- 86(1989).
- [122] Katz J. D., and Blake R.D., *Am. Ceram. Soc.*, **70** [08] 1304-08(1991).
- [123] Holcombe C. E. and Dykes N. L., *J. Mater. Sci.*, **9** 425-28 (1990).
- [124] Tian Y. L., Feng J. H., Sun L. C., and Tu C. J., pp. 41-46, Materl Res Soc, Pittsburgh, PA, (1992).
- [125] Hoshizuki H., Mitsudo S., Saji T., Matsuura K., Idehara T., Glyavin M., Ereemeev A., Honda T., Iwai Y., Nishi H., Kitano A. and Ishibashi J., *Int. J. Infrared Millimetre Waves*, **26** [11] 1531-41(2005).
- [126] A. Birnboim and Carmel Y., *J. Am. Ceram. Soc.*, **82** 3024-30(1999).
- [127] Harabi A, Karboua N. and Achour S., Design and Realization of a High Temperature (~1550°C) Microwave Heating Element at 2.45 GHz, Algeria, Patent pending, 8 pages, (2011).
- [128] Bykov Y. V., Egorov S. V., Ereemeev A. G., Rybakov K. I., Semenov V. E., Sorokin A.A., *J. Mater. Sci.*, **36** 131-36(2001).
- [129] Karboua N., Harabi A., and Achour S., *Alg. J. Adv. Mater.*, **3** 167-70(2006).
- [130] Karboua N., Harabi A., and Achour S., 4th Arab Congress on Materials Science, (ACMS-IV) Tripoli 26-28/09. pp. 460-467(2005).
- [131] Hench L. L., *J. Am. Ceram. Soc.*, 74 1487-1510 (1991).
- [132] Liu C., Huang Y., Shen W. and Cui J., *Biomaterials*, 22 301-306(2001).
- [133] Jarcho M., Bolen C. H., Thomas M. B., Bobick J., Kay J. F. and Doremus R. H., *J. Mater. Sci.*, 11 2027-2035(1976).
- [134] Osaka A., Miura Y., Takeuchi K., Asada M. and Takahashi K., *J. Mater. Sci.: Mater. In Med.*, 2551-55(1991).

- [135] Jilavenkatesa A. and Sr Condrate R.A., *J. Mater.Sci.*, 33 4111-4119(1998).
- [136] Varma H. K., Kalkura S. N. and Sivakumar R., *Ceram. Int.*, 24 [6] 467-470(1998).
- [137] Anee Kuriakose T., Narayana S., Palanichamy M., Arivuoli D., Dierks K., Bocelli G. and Betzel C., *J. Crystal Growth*, 263 [1-4] 517-523(2004).
- [138] Hing K. A., Best S. M, Tanner K.E., Bonfield W. and Revell P.A., *J.Mater. Sci.: Mater in Med.*, 10 663-670(1999).
- [139] Joschek S., Nies B., Krotz R. and Goepferich A., *Biomaterials*, 21 1645-1658(2000).
- [140] Mezahi F., Harabi A., Zouai S., Achour S. and Bernache - Assollant D., *Mater. Sci. Forum*, 492-493 241-248(2005).
- [141] Mezahi F., Oudadesse H., Harabi A., Lucas-Girot A., Le Gal Y., Chaair H. and Cathelineau G., *J. Thermal Anal. And Calor.*, 95 [1] 21-29 (2009).
- [142] Harabi A., Belamri D., Karboua N., Mezahi F.Z., *J. Thermal Anal. And Calor*, published online: 04 Nonember (2010).
- [143] Hamilton V.E., *Journal of Geophysical Research*, **105**, 9701-9716 (2000).
- [144] Hulbert S. F., Hench L. L., Forbers D. and Bowman L. S., *History of Bioceramics, Ceram. Int.*, **8**,131-140 (1982).
- [145] Harabi A., Zouai S., Achour S., Karboua N., Chehlatt S. and Benlahrache, M. T. *Sintering*'5,172-175(2005).
- [146] Fang Y., Agrawal D.K., Della M.R., Rustum R. *J.Mater. Res*, **9**, 180-187., (1994).

International Journal of
**Applied
Ceramic
TECHNOLOGY**

Ceramic Product Development and Commercialization

Effect of Thickness and Orientation of Alumina Fibrous Thermal Insulation on Microwave Heating in a Modified Domestic 2.45 GHz Multi-mode Cavity

Abdelhamid Harabi,* Nouredine Karboua, and Slimane Achour

Ceramics Laboratory, Mentouri University, Constantine 25000, Algeria

A rectangular piece of alumina fiber insulation was designed to prevent heat loss. The heat source was generated by a susceptor material, which was used as a microwave (MW) absorber (heater). The thicknesses of different sides (frontal, lateral, and longitudinal) of the insulation piece were varied from side to side to study the penetration level of MW electromagnetic field coming from both horizontal and vertical incidences. The experience has shown an increase in temperature when top and longitudinal thicknesses were decreased. It has also been found that specific orientation of the insulation box leads to a maximum MW heating efficiency.

Introduction

Because of the effectiveness (high) cost of ceramics production using conventional sintering (CS), due to their higher sintering temperatures for longer holding times. Therefore, to overcome this drawback an alternative process, the so-called microwave (MW) sintering, was proposed.

Indeed, MW sintering of ceramics has gained much attention during the last decade. Reasons for the growing interest in the use of MW energy include rapid heating, enhanced densification rate, decreased sintering active energy, and improved microstructure.^{1–4} MW sintering also has the potential for energy and cost savings when compared with CS.^{1,5,6} For example, at 1100°C the bulk densities of hydroxyapatite (HA) samples prepared from calcined bovine bone⁷ using CS and MW sintering were about 2.49 (for 120 min) and 2.93 (for 15 min) g/cm³, respectively. Furthermore, a near theoretical density (98.6%) was obtained when HA

*Harabi52@gmail.com

Development of a Microwave Heating System and its Application for the Sintering of Ceramics Materials

Abstract

The aim of the present work was to reach thermal processing of ceramics materials using microwave radiation. To achieve this aim a high temperature heating system working at 2.45 GHz was developed. The development of such heating system can be summarized into four main steps:

First step: the development of a Heating element made with silicon carbide (**SiC**) material as a single piece with cylindrical shape. This element was able to receive samples with diameter higher than 13 mm.

Second step: development of a thermal insulation based on fiber alumina material (**Al₂O₃**) with a double layer architecture more resistible to thermal choc.

Third step: development of a temperature regulator device to allow temperature controlling cycle by programming the different desired values of heating parameters such as heating rate, maximum temperature and socking time. The functioning of this device was based on the principle of switch on and off of the magnetron electric feeding.

Forth step: development of a cooling system to ovoid magnetron overheating. This later ,generally , causes the shutoff if not damage of the magnetron by security switcher device of the microwave oven. The cooling system allowed prolonged processing times from **5 min** to about **20 min.** at high temperature values (**1000°C-1650°C**).

Some experimental studies were carried out on the four steps developed heating system. Mainly the effect of electromagnetic field distribution inside the multy- mode cavity. This study has revealed the possibility to concentrate the intensity of MW in the aria of the heating element piece. Consequently the efficiency of heating was increased. In addition, the study conducted on

the effect of both insulation thickness and orientation on MW heating has permeated the optimization of the thickness of the insulation to about 1.5 cm. in term of dimension and an angle of orientation of 45° in term of position.

The developed heating system was investigated in heat treatment of three kinds of ceramics materials: Mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), Hydroxiapatite (**HA: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$**) and Diopside ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) . It has been found that the obtained results concerned, especially, the MW sintering densities were much higher than those obtained by conventional sintering.

Key words: Microwave (MW), MW Heating Element, Susceptor, thickness, Orientation, Thermal Insulation, Mulite, Hydroxiapatite, Diopside.

Développement d'un système de Chauffage a Micro-onde et sont utilisation pour le frittage des Matériaux Céramiques

Résumé

L'objectif majeur de la présente étude, cité en intitulé, est d'aboutir au traitement thermique des matériaux céramiques, notamment leurs frittages, en utilisant les radiations des micro-ondes opérant à 2.45GHz. Pour atteindre cette objectif nous avons développez un system de chauffage à haute température. Le développement de ce system peut être résumé en quatre étapes essentielles :

- ❖ Première étape : Développement d'un élément chauffant a base de carbure de silicium (**SiC**) de forme d'une pièce cylindrique creuse capable d'accueillir des échantillons ayant un diamètre de plus de 13 mm.
- ❖ Deuxième étape : était consacrer au développement d'un system d'isolation thermique a base d'alumine (**Al₂O₃**) fibreux ayant une architecture en double couche plus résistible aux choc thermiques.
- ❖ Troisième étape : consistait en le développement d'un dispositif de régulation de température permettant de contrôler le chauffage en programmant la vitesse, la température et le temps de maintien du cycle de chauffage désiré. Ce dispositif est basé sur le principe d'ouverture et de fermeture de l'alimentation du magnétron du four à micro-onde.
- ❖ Quatrième étape : Développement d'un system de refroidissement destiné à éviter le sur-chauffage du magnétron qui entraînait généralement son arrêt par le dispositif de sécurité du four. Il a permit d'allonger les temps de traitement de **5** à **20** minutes dans l'intervalle des hautes températures (**1000°C-1650°C**).

Des études expérimentales ont suivi les quatre étapes de développement du system de chauffage à micro-onde. Notamment l'étude sur l'effet de la distribution du

champ électromagnétique à l'intérieure de la cavité du four sur le chauffage à micro-onde a permis la découverte d'une méthode de concentration du champ des micro-ondes au voisinage de l'élément chauffant ce qui à traduit un rondement de chauffage plus élevé.

L'étude sur l'effet de l'épaisseur et de l'orientation du bloc de l'isolation thermique sur le chauffage à micro-onde a permis d'optimiser cette dernière à des valeurs moyennes d'épaisseurs de **1.5** centimètres et d'un angle d'orientation de **45°**.

Le system de chauffage ainsi développé a été investi dans le traitement thermique de trois types de matériaux céramiques : la Mulite ($3\text{Al}_2\text{O}_3\text{2SiO}_2$), Hydroxiapatite (**HA: $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$**) et la Diopsite ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$). Les résultats obtenus notamment les densités de frittage par chauffage micro-onde étaient considérablement élevés par apport à celles trouvés par la méthode conventionnelle des mêmes échantillons des matériaux précédant.

Mots clefs : Micro-onde, Elément chauffant, Isolation Thermique, épaisseur, Orientation, Mulite, Hydroxiapatite, et Diopsite.

تطوير منظومة تسخين بالميكرويف و استعمالها في تلييد المواد الخزفية

ملخص

قمنا من خلال هذا البحث بتطوير منظومة تسخين تعمل بالميكرويف عند التردد **2.45 GHz**. ارتكزت عملية التطوير أساسا على أربعة محاور:

- ❖ المحور الأول اشتمل على توسيع حجم عنصر التسخين العامل بالميكرويف ليمسح باستيعاب عينات خزفية أكبر يسهل إجراء القياسات عليها بعد معالجتها
- ❖ المحور الثاني اشتمل على تطوير نظاما للعزل الحراري من الألومينا الليفي **Al₂O₃ fibre** ذو هندسة ذات بطانة مزدوجة يتميز بسهولة تركيبه و بقدرة عالية على مقاومة الإجهاد الحراري
- ❖ المحور الثالث يكمن في تصميم و تطوير نظاما للتحكم في درجة الحرارة يمكن برمجته بإدخال درجة الحرارة المعالجة و زمن المكوث و كذلك سرعة التسخين. مبدأه يكمن في فتح و غلق دائرة التغذية للمغنترون بواسطة موصل ستاتيكي صلب ذو استطاعة عالية بوجود قاسم للتوتر عبارة عن محول كهربائي و مكثفة توتر عالي.
- ❖ المحور الرابع اشتمل على تركيب نظاما خارجيا للتبريد مدعما لنظام التبريد الداخلي هدفه منع مغنترون فرن الميكرويف المعدل من بلوغ درجة حرارة حرجة تتسبب غالبا في توقيف اشتغاله و حتى إتلافه. سمح نظام التبريد بتمديد أزمدة المعالجة من **5 min** إلى حدود **20 min** عند مجال درجات الحرارة العالية بين **1000°C** و **1650°C**.

تم دراسة تأثير توزيع الحقل الكهرومغناطيسي داخل مطبق متعدد الأنماط لفرن الميكرويف باستعمال منظومة التسخين المطورة حيث تم اكتشاف طريقة لتركيز حقل موجات الميكرويف في مركز عنصر التسخين و بذلك جعل التسخين أكثر فعالية. كما أجرت دراسة تجريبية أخرى على مدى تأثير كلا من سمك و توجه العازل الحراري المطور على التسخين بالميكرويف. حيث سمحت الدراسة بتحديد الأبعاد الثلاث و التوجه الأمثل للعازل الحراري الذي يعطي أعلى مردود في التسخين. في الأخير تم استثمار منظومة الميكرويف المطورة في المعالجة الحرارية لثلاث أنواع من الخزفيات المشهورة وهي مادة الملايت (**Mulite**) و مادة العظم (**hydroxiapatite**) و مادة الديوبسايت (**Diopside**). قورنت نتائج تلييد المواد السابقة مع التلييد الكلاسيكي لنفس المواد فوجدت أنها أفضل بكثير سواء من حيث مدة المعالجة التي كانت أقصر أو من حيث درجة حرارة المعالجة التي كانت أخفض و هذا باستعمال طريقة الميكرويف المقترحة في هذه الدراسة.

الكلمات المفتاحية : ميكرويف، سببوتور، عنصر التسخين بالميكرويف، سمك، توجه، العازل الحراري، الملايت، العظم، الديوبسايت.