



جامعة حلب
كلية الهندسة الميكانيكية
قسم هندسة الطاقة

دراسة أداء بعض مواد العزل للحصول على مادة عزل من مواد أولية محلية بمواصفات جيدة

رسالة قدمت لنيل شهادة الدكتوراه في هندسة الطاقة

إعداد المهندسة
روالي توفيق ماردلي



جامعة حلب
كلية الهندسة الميكانيكية
قسم هندسة الطاقة

دراسة أداء بعض مواد العزل للحصول على مادة عزل من مواد أولية محلية بمواصفات جيدة

رسالة قدمت لنيل شهادة الدكتوراه في هندسة الطاقة

إعداد المهندسة
رولي توفيق ماردلي

إشراف

الدكتور المهندس : ماجدة برمدا

أستاذ مساعد بقسم هندسة الطاقة

من كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة حلب

الدكتور المهندس : عامر حاج طالب

مدرس بقسم هندسة الطاقة

من كلية الهندسة الميكانيكية – جامعة حلب

شهادة

نشهد بأن العمل الموصوف في هذه الأطروحة "دراسة أداء بعض مواد العزل للحصول على مادة عزل من مواد أولية محلية بمواصفات جيدة" هو نتيجة بحث علمي قامت به المرشحة المهندسة روللي توفيق ماردللي بإشراف الدكتور المهندس ماجدة برمدا الأستاذ المساعد في قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب وبمشاركة الدكتور المهندس عامر حاج طالب المدرس في قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب وأي رجوع إلى بحث آخر في هذا الموضوع موثق في النص.

المشرف الرئيسي

د.ماجدة برمدا

المشرف المشارك

د.عامر حاج طالب

المرشحة للدكتوراه

روللي توفيق ماردللي

حلب في 28/6/2018 م

CERTIFICATE

It is hereby certified that the work described in this thesis: "**Studying the Performance of Insulation Materials to Obtain a Thermal insulation Material from Raw Materials with Good Specifications**" is the result of the author's own investigations under the supervision of **Dr. Majda Barmada & Dr. Amer Haj Taleb** in the Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, University of Aleppo and any references to other research work has been acknowledged in the text.

Candidate

Rolly Tawfeek Mardelly

Assistant supervisor
Dr. Amer Haj Taleb

Main supervisor
Dr. Majda Barmada

Date 28/6/2018

تصريح

أصرح بأن البحث "دراسة أداء بعض مواد العزل للحصول على مادة عزل من مواد أولية محلية بمواصفات جيدة" لم يسبق له أن قبل للحصول على شهادة الدكتوراه ولا هو مقدم حالياً للحصول على أية شهادة أخرى.

المرشحة للدكتوراه
المهندسة روللي ماردللي

DECLARATION

It is hereby declared that this work "Studying the Performance of Insulation Materials to Obtain a Thermal insulation Material from Raw Materials with Good Specifications" not already been accepted for any degree, and it is not being submitted concurrently for any other degree.

Candidate

Rolly Tawfeek Mardelly

Aleppo 28 / 6 / 2018

نوقشت هذه الرسالة وأجيزت يوم 28 / 6 / 2018 على مدرج الدكتور المرحوم أحمد فيصل العمر في
كلية الهندسة الميكانيكية جامعة حلب
لجنة الحكم على الرسالة:

رئيساً	أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية	د. أحمد نديم عقاد
عضواً	أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية	د. فاروق العبود
عضواً	أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية	د. صلاح الحاج عمر
عضواً ومشرفاً	أستاذ مساعد في كلية الهندسة الميكانيكية	د. ماجدة برمدا
عضواً	مدرس في كلية الهندسة الميكانيكية	د. خالد اصطيفي

**Syrian Arab Republic
Aleppo University
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Energy Engineering**



**Studying the Performance of Insulation Materials to
Obtain a Thermal insulation Material from Raw Materials
with Good Specifications**

**A thesis submitted for phd degree of of Energy Engineering in
the Mechanical Engineering**

By

Rolly Tawfeek Mardelly

2018

**Syrian Arab Republic
Aleppo University
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Energy Engineering**



**Studying the Performance of Insulation Materials to
Obtain a Thermal insulation Material from Raw Materials
with Good Specifications**

**A thesis submitted for phd degree of of Energy Engineering in
the Mechanical Engineering**

By

Rolly Tawfeek Mardelly

Supervised by

Dr. Majda Barmada
Department of Faculty of
Mechanical Engineering
Aleppo University

Dr. Amer Haj Taleb
Department of Faculty of
Mechanical Engineering
Aleppo University

2018

الفهرس

1	الفصل الأول
1	المقدمة والدراسة المرجعية
1	1-1 مقدمة عامة
3	2-1 الخطوط العامة للرسالة
3	3-1 تعاريف ومفاهيم رئيسية
3	1-3-1 العزل الحراري
3	2-3-1 مزايا استخدام العزل الحراري
4	3-3-1 حماية المبنى
4	4-3-1 المواد العازلة للرطوبة
5	5-3-1 آليات انتقال الحرارة
5	6-3-1 الإيصالية الحرارية
5	7-3-1 معامل انتقال الحرارة الإجمالي
6	8-3-1 خصائص العازل الحراري
7	9-3-1 أهم اعتبارات تطبيق العزل الحراري
8	10-3-1 تصنيف المواد العازلة وفقاً للتركيب والبنية والشكل
8	1-10-3-1 التصنيف حسب التركيب الكيميائي
8	2-10-3-1 التصنيف حسب البنية
9	3-10-3-1 التصنيف حسب الشكل النهائي للعازل
10	11-3-1 بعض المواد العازلة للحرارة ومميزاتها
15	12-3-1 طرائق العزل الحراري
15	1-12-3-1 عزل الأسطح
16	2-12-3-1 عزل الجدران الخارجية
18	3-12-3-1 عزل الجدران الداخلية
18	4-12-3-1 عزل الأرضيات
19	4-4-1 لمحة عن بعض مواد العزل والبناء
19	1-4-1 مقدمة
20	2-4-1 الحجر الكلسي - الجير
20	3-4-1 الغضار (CLAY)

21	4-4-1 الطين الأحمر.....
21	5-4-1 الإسمنت.....
22	1-5-4-1 المكونات الأساسية للإسمنت البورتلاندي.....
23	2-5-4-1 إمالة الإسمنت وتصلبه.....
23	3-5-4-1 الأنواع الرئيسية للإسمنت.....
24	6-4-1 الأيروجيل.....
26	7-4-1 القرميد.....
27	8-4-1 الخرسانة الخبوية AC.....
30	9-4-1 العوامل المولدة للرغوة وعوامل توسع الإسمنت.....
30	1-9-4-1 العوامل الرغوية.....
30	2-9-4-1 مسحوق الألمنيوم.....
31	5-1 الهندسة الكسيرية.....
32	6-1 الدراسة المرجعية.....
53	7-1 خلاصة الدراسة المرجعية.....
56	الفصل الثاني.....
56	أهمية البحث وأهدافه.....
56	1-2 أهمية البحث وأهدافه.....
58	الفصل الثالث.....
58	القسم العملي.....
58	1-3 مقدمة.....
58	2-3 المرحلة الأولى.....
60	1-2-3 تحديد تركيز المحلول الحمضي.....
62	2-2-3 الاختيار المناسب للقالب.....
63	3-3 المرحلة الثانية.....
65	4-3 المرحلة الثالثة.....
66	5-3 الاختبارات المنفذة على العينات.....
66	1-5-3 اختبار المسامية - الكثافة الظاهرية - امتصاص الماء.....
68	2-5-3 اختبار الإيصالية الحرارية.....
70	3-5-3 اختبار العزل الصوتي.....
71	4-5-3 اختبار المقاومة الميكانيكية.....

73	الفصل الرابع.....
73	النتائج والمناقشة
73	1-4 مقدمة
73	2-4 نتائج اختبارات المرحلة الثانية
84	3-4 نتائج اختبارات المرحلة الثالثة.....
86	4-4 الدراسة التحليلية.....
94	5-4 نتائج الدراسة التحليلية.....
99	1-4-4 الحالة الرطبة
104	2-4-4 الحالة الجافة.....
105	3-4-4 حالة الإشباع الكامل بالرطوبة
112	الفصل الخامس.....
112	الخلاصة والتوصيات.....
112	1-5 الخلاصة
114	2-5 التوصيات
115	المراجع العلمية.....
116	المراجع العربية.....
120	الأبحاث المنشورة

فهرس الأشكال

- الشكل (1-1) ألواح البوليسترين الصلبة.....9
- الشكل (2-1) ألواح الصوف الزجاجي شبه الصلبة.....9
- الشكل (3-1) البولي أوريثان المطبق بالحقن.....10
- الشكل (4-1) البولي ايثيلين الخلوي.....11
- الشكل (5-1) بعض أنواع الزجاج المضاعف المستخدم في العزل الحراري.....12
- الشكل (6-1) طريقة استخدام الصوف الزجاجي في العزل الحراري.....12
- الشكل (7-1) البوليسترين الممدد.....13
- الشكل (8-1) البوليسترين الرغوي المستخدم في العزل الحراري.....13
- الشكل (9-1) حبيبات البيرلايت المستخدمة في العزل الحراري.....14
- الشكل (10-1) نظام العزل للسطح التقليدي.....15
- الشكل (11-1) نظام السطح المقلوب في العزل.....16
- الشكل (12-1) نظام الجدار الواحد.....17
- الشكل (13-1) نظام الجدار الواحد المعزول بشريحة واحدة.....17
- الشكل (14-1) النظام التقليدي: نظام الجدارين المتوازيين.....17
- الشكل (15-1) تثبيت العوازل الحرارية على الجدران الخارجية للمبنى.....18
- الشكل (16-1) نظام العزل من الداخل.....18
- الشكل (17-1) عزل الأرضيات.....19
- الشكل (18-1) التغيرات التي تطرأ على تفاعل الإماهة للإسمنت مع الزمن.....23
- الشكل (19-1) أداء الأيروجيل العالي في العزل الحراري.....25
- الشكل (20-1) أشكال الأيروجيل.....26
- الشكل (21-1) طريقة توضع الأيروجيل كمادة عازلة [9].....26
- الشكل (22-1) تصنيف الخرسانة الخلوية أو المشبعة بالهواء.....28
- الشكل (23-1) انخفاض وزن الخرسانة المشبعة بالهواء.....28
- الشكل (24-1) تغيرات درجة الحرارة خلال الليل والنهار في يومين من أيام شهر كانون الثاني من أجل مباني بجدران مختلفة التركيب:.....32
- الشكل (25-1) الأداء الحراري للعينات.....32
- الشكل (26-1) عينة الأيروجيل - غضار (aero clay): التوضع الشاقولي والأفقي للدعائم.....36
- الشكل (27-1) استخدام المزدوجات الحرارية لتحديد الايصالية الحرارية للعينة.....37

- الشكل (1-28) تغير الايصالية الحرارية للعينة مع تغير محتوى الأيروجيل فيها 39
- الشكل (1-29) ثبات عينة الأيروجيل (وزناً) مع تغير درجات الحرارة 38
- الشكل (1-30) تغير المقاومة الميكانيكية للعينة مع تغير محتوى الأيروجيل فيها 39
- الشكل (1-31) الخرز البلوري المائي مع العينة الخرسانية الناتجة 39
- الشكل (1-32) طريقة تصنيع AAC 41
- الشكل (1-33) الرسم التخطيطي للتوصيل الحراري في الوسط المسامي 46
- الشكل (1-34) دراسة الوسط المسامي وفق حصىرة سيرينسكي $L=3, C=1$ 48
- الشكل (1-35) تحديد رقم التكرار تجريبياً 49
- الشكل (1-36) حصىرة سيرينسكي 50
- الشكل (3-1) الملاط بعد إضافة الكمبرلان إليه 61
- الشكل (3-2) الملاط بعد إضافة كربونات الأمونيوم إليه 61
- الشكل (3-3) القالب المصمم لصب العينات 63
- الشكل (3-4) المزج اليدوي للعينات 64
- الشكل (3-5) قياس المسامية 67
- الشكل (3-6) وزن الجسم المشبع الماء 67
- الشكل (3-7) وزن الجسم المعلق بالماء 68
- الشكل (3-8) أجزاء جهاز تحديد الايصالية الحرارية في مخبر الفيزياء في كلية الهندسة الميكانيكية 69
- الشكل (3-9) اختبار العزل الصوتي 71
- الشكل (3-10) اختبار المقاومة الميكانيكية على الضغط 72
- الشكل (4-1) الوزن الجاف والمعلق والمشبوع والحجم والوزن النوعي الظاهري للعينات 74
- الشكل (4-2) المسامية الظاهرية ونسبة الماء الممتص 75
- الشكل (4-3) الكثافة الظاهرية للعينات الثلاث 75
- الشكل (4-4) أشكال البنية المسامية للعينات الثلاث 76
- الشكل (4-5) معامل التوصيل الحراري K للعينات الثلاث 78
- الشكل (4-6) جهاز اختبار معامل امتصاص الصوت 79
- الشكل (4-7) جهاز التغذية الكهربائي الخاص باختبار معامل امتصاص الصوت 79
- الشكل (4-8) معامل امتصاص الصوت 80
- الشكل (4-9) المقاومة الميكانيكية للعينات 81
- الشكل (4-10) معامل التوصيل الحراري لعينات كلوريد الصوديوم 85

- الشكل (4-11) مقارنة بين معامل التوصيل الحراري والمسامية لعينات المرحلة الثانية 85
- الشكل (4-12) تغير المقاومة الميكانيكية لعينات كلوريد الصوديوم 86
- الشكل (4-13) المناخل المستخدمة في تحديد التوزع الحجمي والحبيبي لجزيئات الإسمنت 95
- الشكل (4-14) استخدام matlab في حل جملة ثلاثة معادلات بثلاث مجاهيل 97
- الشكل (4-15) مقارنة خصائص وأبعاد الوسط المسامي للعينتين (10) و(11) 99
- الشكل (4-16) تغير الثابت التجريبي مع قيمة معامل التوصيل الحراري النظرية للعينتين معاً في الحالة الرطبة..... 102
- الشكل (4-17) الثابت التجريبي للعينة الأولى في الحالة الرطبة..... 103
- الشكل (4-18) لثابت التجريبي للعينة الثانية في الحالة الرطبة..... 103
- الشكل (4-19) حصيرة سيرينسكي في الحالة الجافة (غياب الطور الرطب- الحالة الأولى). 104.
- الشكل (4-20) حصيرة سيرينسكي في الحالة الجافة (غياب الطور الرطب- الحالة الثانية).. 106.
- الشكل (4-21) تغير قيمة معامل التوصيل الحراري النظري في الحالة الجافة الثانية مع t من أجل العينة الأولى 108
- الشكل (4-22) اسقاط قيمة المعامل التجريبي في الحالة الجافة على المنحني -العينة الأولى. 109.
- الشكل (4-32) اسقاط قيمة المعامل التجريبي في الحالة الجافة على المنحني -العينة الثانية.. 109.
- الشكل (5-1) البعد w 115

فهرس الجداول

- جدول (1-1) نسبة العناصر الكيميائية المكونة للقشرة الأرضية 19
- جدول (2-1) متطلبات تصنيع AAC 29
- جدول (3-1) تركيب العينات الإحدى عشر للقرميد الأحمر الليفي 33
- جدول (4-1) المقاومة الميكانيكية وامتصاص الماء والكثافة للعينات 33
- جدول (5-1) المواد الخام لتصنيع AAC 42
- جدول (6-1) التوزع الحجمي الحبي والوزني لجزيئات الرمل المكونة للصخور 52
- جدول (1-3) كميات الماء والحمض التقريبية اللازم إضافتها لحين حدوث تعادل في الوسط ... 60
- جدول (1-4) الوزن الجاف والمعلق والمشبع للسلسلة الأولى والثانية 73
- جدول (2-4) نتائج المسامية ونسبة الماء الممتص لعينات السلسلة الأولى 74
- جدول (3-4) نتائج المسامية ونسبة الماء الممتص لعينات السلسلة الثانية 74
- جدول (4-4) نتائج المسامية ونسبة الماء الممتص الوسطية بين السلسلتين 74
- جدول (5-4) نتائج معايرة جهاز قياس معامل التوصيل الحراري 76
- جدول (6-4) معامل التوصيل الحراري للعينات المحضرة في السلسلة الأولى 77
- جدول (7-4) معامل التوصيل الحراري للعينات المحضرة في السلسلة الثانية 77
- جدول (8-4) معامل التوصيل الحراري الوسطي للعينات المحضرة 77
- جدول (9-4) نتائج معامل امتصاص الصوت 79
- جدول (10-4) دمج نتائج العينات المحضرة في هذه الأطروحة مع معامل امتصاص الصوت لمواد مختلفة 80
- جدول (11-4) نتائج المقاومة الميكانيكية لإجهاد الضغط للسلسلة الأولى من العينات 81
- جدول (12-4) نتائج المقاومة الميكانيكية لإجهاد الضغط للسلسلة الثانية من العينات 81
- جدول (13-4) نتائج المقاومة الميكانيكية النهائية لإجهاد الضغط 81
- جدول (14-4) دمج نتائج المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية للعينات مع متطلبات المواصفة ASTM C1693 82
- جدول (15-4) دمج نتائج المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية والايصالية الحرارية للعينات مع خصائص aerated concrete 82
- جدول (16-4) دمج نتائج العينات المحضرة في هذه الأطروحة مع مواصفات القياسية السورية للعزل الحراري 83
- جدول (17-4) معامل التوصيل الحراري لعينات كلوريد الصوديوم 84
- جدول (18-4) نتائج المقاومة الميكانيكية لسلسلة عينات يدخل في تركيبها كلوريد الصوديوم ... 86

94	جدول (4-19) الوزن الجاف والمعلق والمشبع
94	جدول (4-20) نتائج المسامية والكثافة الظاهرية
94	جدول (4-21) التوزع الوزني والحجمي للجزيئات
96	جدول (4-22) الخطوات المتبعة لحساب البعد الكسيري
97	جدول (4-23) المتغيرات الأساسية
97	جدول (4-24) قيم L,C,n التجريبية لخصيرة سيرينسكي
98	جدول (4-25) قيم L,C,n لخصيرة سيرينسكي وفق المرجع [24]
98	جدول (4-26) قيم L,C,n لخصيرة سيرينسكي وفق المرجع [25]
100	جدول (4-27) حساب درجة الإشباع
100	جدول (4-28) معامل التوصيل الحراري التجريبي لكل عينة في الحالة الرطبة
101	جدول (4-29) معامل التوصيل الحراري النظري والتجريبي لكل عينة في الحالة الرطبة
101	جدول (4-30) يبين مقدار الخطأ في قيمة معامل التوصيل الحراري التجريبي في الرطبة
103	جدول (4-29) معامل التوصيل الحراري التجريبي لكل عينة في الحالة الجافة
104	جدول (4-30) معامل التوصيل الحراري التجريبي والنظري لكل عينة في الحالة الجافة

المخلص

نتيجة للتغيرات المستمرة التي تحدث في أساليب البناء والعمران، ظهرت الحاجة إلى إيجاد طرق أكثر فاعلية تخدم الحركة العمرانية المتزايدة مع توفير طرق ملائمة لتأمين شروط الراحة الحرارية وبأقل التكاليف. جاءت فكرة العازل الحراري لتلعب دوراً هاماً لتوفير استهلاك الطاقة وتخفيض التلوث البيئي والانبعاث الحراري، ولما كان العزل الحراري محورياً هاماً تتبناه معظم أقسام الهندسة الميكانيكية والمدنية والمعمارية وهندسة البيئة. جاء هذا البحث ليخدم كافة القطاعات، وليدعم الاقتصاد الوطني، بتقديم مادة اسمنتية تفيد في البناء والعزل الحراري، منخفضة التكلفة، سهلة التطبيق، تساعد على التخلص من بعض المخلفات، وتؤمن حلاً بديلاً عن تكاليف التدفئة والتكييف في ظل التقنين الكهربائي الذي تشهده معظم قطاعات الدولة.

يتناول هذا البحث أهم العوازل الحرارية، تصنيفها، الفائدة منها، وأساليب تطبيقها، مع تقديم صورة عن المواد الخام المتواجدة في القطر العربي السوري التي يمكن تطبيقها في العزل ومواد البناء (الغضار، الكلس الحي...) بغية تقديم صورة عن العينة الاسمنتية الخليوية العازلة التي سيتم تصنيعها في هذا البحث، والتي ستخضع لاختبارات المقاومة الميكانيكية والايصالية الحرارية والعزل الصوتي وتحديد المسامية والكثافة الظاهرية.

يجزأ القسم العملي إلى ثلاث مراحل: المرحلة الأولى وهي المرحلة المتعلقة بتحضير عينات إيروجيل من أساس غضاري، ثم الاستعانة بالغضار كبديل عن الإيروجيل، وصولاً إلى الخرسانة العازلة مع اقتراح عامل توسع جديد للاسمنت هو حمض الكبريت، واستعراض مساوئ تطبيقه.

المرحلة الثانية وهي المرحلة التي يتم فيها تحضير سلاسل لثلاث عينات اسمنتية بالشكل التالي: العينة الأولى مصنعة من الإسمنت واوكسيد الكالسيوم ومسحوق الألمنيوم والعينة الثانية مصنعة من الإسمنت ومسحوق الألمنيوم فقط والعينة الثالثة مصنعة من الإسمنت ومسحوق الألمنيوم وكلوريد الصوديوم. ولقد تراوح معامل التوصيل الحراري $0.192-0.223 \frac{W}{m.K}$ وتراوحت المقاومة الميكانيكية $0.72-4.58 Mpa$ وتراوح معامل امتصاص الصوت $0.14-0.269 cm^{-1}$ ، أما المسامية فقد تراوحت $18.85-22.1-68.9\%$ والكثافة الظاهرية $587.1 - 1185.35 \frac{Kg}{m^3}$ ونسبة امتصاص الماء $18.85-117.575\%$.

يتم في المرحلة الثالثة تحضير ثلاث عينات اسمنتية متماثلة فيما بينها بنسب الاسمنت ومسحوق الألمنيوم واوكسيد الكالسيوم ومختلفة عن بعضها بكمية كلوريد الصوديوم المضافة (5%)،

10%، 15%) فكانت النتائج: للعينه الأولى معامل التوصيل الحراري $\frac{W}{m.K}$ 0.114، المقاومة الميكانيكية 5.38Mpa وللعينه الثانية: معامل التوصيل الحراري $\frac{W}{m.K}$ 0.166، المقاومة الميكانيكية 1.96Mpa وللعينه الثالثة: معامل التوصيل الحراري $\frac{W}{m.K}$ 0.217، المقاومة الميكانيكية 1.37Mpa وهذا يعني أنه يجب ألا تتجاوز نسب اضافة ملح كلوريد الصوديوم عن 5% والتي توافق إيصالية حرارية منخفضة ومقاومة ميكانيكية عالية.

في الدراسة التحليلية:

تم إنتاج عينتين اسمنتيتين مصنعين من نفس التركيب الكيميائي (اسمنت، مسحوق ألمنيوم، الكلس الحي) وبمسامية واحدة تقريباً 70.5% وبدرجتي إشباع بالرطوبة مختلفتين فكان معامل التوصيل الحراري التجريبي للعينه الأولى $\frac{W}{m.K}$ 0.1246 وللعينه الثانية: $\frac{W}{m.K}$ 0.1309، (تقود زيادة الرطوبة إلى ارتفاع الايصالية الحرارية).

تمت نمذجة الوسط المسامي للمادة العازلة باستخدام حصيرة سيرينسكي (الهندسة الكسيرية)، وتقسيم المادة العازلة إلى خلايا واحدية بطول جانبي L ومربعات متمركزة في الوسط بطول ضلع C ، وتم حساب البعد الكسيري باستخدام التوزع الحجمي الحبيبي لينتج عنه دراسة المقاوامات الحرارية واستخلاص قيمة معامل التوصيل الحراري نظرياً باستخدام برنامج *matlab*، فكان معامل التوصيل الحراري النظري في الحالة الرطبة للعينه الأولى: $k_{theo,w} = 0.1281(\frac{W}{m.K})$ وللعينه الثانية: $k_{theo,w} = 0.1361(\frac{W}{m.K})$ وهذا يعني الاختلاف بين معاملي التوصيل الحراري التجريبي والنظري في الحالة الرطبة من أجل العينه الأولى يشكل 2.66% والاختلاف في العينه الثانية 3.78%، من أجل الحالة الجافة، تم تحديد قيمة t (سماكة الجسور الصلبة في تمثيل سيرينسكي) حيث شكلت 0.35 من قيمة C .

كل ماسبق أكد ضرورة انتشار الخرسانة العازلة كمادة رخيصة الثمن، يمكن تطبيقها في البناء، بسيطة في التصنيع، وسهلة في التطبيق، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير الرطوبة السيء على الايصالية الحرارية للمادة.

الفصل الأول

المقدمة والدراسة المرجعية

1-1 مقدمة عامة

قاد التضخم السكاني وتوسع المدن في الآونة الأخيرة إلى ازدياد متطلبات حفظ الطاقة في المباني والمنشآت، إن ازدياد تكلفة الحصول على الطاقة والتأثير المنعكس على البيئة الناتج عن ذلك، يشير إلى ضرورة إيجاد وسائل فاعلة لخفض الاستهلاك، بهدف تخفيض العبء عن ذوي الدخل المحدود وتخفيض الهدر العام، حيث يشكل تكييف وتدفئة المباني القسم الأعظم من استهلاك الطاقة في العالم، تبرز من هنا الحاجة إلى تطوير مواد بناء عازلة لتخفيض الطاقة المهدورة على تأمين شروط الراحة الحرارية للإنسان.

إن اعتماد الأساليب التي تساهم بالتوفير الفعال للطاقة في المباني والإنارة والصناعة ووسائل النقل، يمكن أن ينقص من معدل استهلاك الطاقة في العالم بمقدار الثلث [1] بحلول عام 2050 مما يخفف من مستوى التلوث ويحد من الاحتباس الحراري في العالم وذلك حسب التقديرات الصادرة عن وكالة الطاقة الدولية.

هناك توجه عالمي للاستخدام الفعال للطاقة في بناء المنازل، والمركبات، والصناعات المختلفة بهدف الحد من استخدام الوقود الأحفوري وذلك بعد أزمة النفط التي ظهرت في العام (1973)، ومن جملة توجهات الاستخدام الفعال للطاقة: تطبيق العزل الحراري في البناء إما بشكل منفصل أو عن طريق الدمج مع الإسمنت، لأن إضافة مواد العزل التقليدية بطبقات وسماكات متعددة (من مصادر عضوية وغير عضوية) يقود إلى بنية بناء معقدة، كما أن استخدام مواد العزل نفسها في البناء يقود إلى سلوك سلبي فيما يتعلق بامتصاص الماء أو البخار، بالإضافة إلى حدوث الضرر الناتج عن الصدمات الخارجية التي يتعرض لها المبنى أو إصدار الغازات السامة لدى اندلاع الحريق في المبنى.

يأتي استثمار العزل الحراري في مرحلة إعادة إعمار المنشآت والبنى التحتية تطبيقاً مباشراً للاستخدام الفعال للطاقة بعد الدمار الكبير الذي خلفته الحرب في بلدنا الحبيب.

تم التوجه في بداية البحث لاستخدام الأيروجيل كمادة عزل تمتاز بمسامية عالية وكثافة منخفضة وذات تطبيقات واستخدامات متنوعة، لكن تصنيع عينة أيروجيل يتطلب تأمين بعض المواد الأولية التي يصعب الحصول عليها ولاسيما في الظروف الاقتصادية القاسية التي مر بها الوطن من حصار وانعدام موارد الطاقة.

لذلك تم السعي للدمج بينها وبين الغضار لتصنيع عينة أيروجيل من أساس غضاري، فتم طحن الغضار ونخله وتجفيفه، لتطبيقه في العزل الحراري، إلا أن خاصية التماسك لم تتحقق إلا بعد اعتماد تطبيق الإسمنت منفرداً كمادة رابطة، لتحقيق عينة خرسانية إسمنتية عازلة¹.

طبقت هذه الخرسانة لأول مرة من قبل السويديين عن طريق مزج الإسمنت والكلس الحي مع الماء والرمل حيث يتمدد المزيج ويتضخم عبر إضافة مسحوق الألمنيوم أو بيروكسيد الهيدروجين ليتم التفاعل الذي يقود إلى بنية فقاعية غازية نتيجة انطلاق غاز الهيدروجين أو الأوكسجين ويمنح الخرسانة خاصية العزل. [2]

تتم معالجة وتجفيف الخرسانة العازلة (AC) (Aerated Concrete) باستخدام الأوتوكلاف وهو وعاء كبير يستخدم لمعالجة الخرسانة تحت تأثير ضغط كبير (8-12) bar ودرجات حرارة منخفضة °C (80-120) وفي هذا البحث تمت معالجة العينات عن طريق إضافة الماء بشكل مستمر لإتمام تفاعل إمهاة الإسمنت وتجفيف العينات اعتماداً على درجة حرارة الغرفة وذلك لتوفير استهلاك الطاقة وللتغلب على مشكلة انقطاع التيار الكهربائي التي اعترضت البحث في تلك الفترة.

تم في هذا البحث أيضاً إضافة الملح (كلوريد الصوديوم) كمكون جديد يساعد على توليد المسام دون أي يؤثر على التركيب الكيميائي للعينة أو على تماسكها، حيث تغسل العينة مباشرة بعد التصلب لنتم إزالة الملح بعد إحداث الفراغات والمسام الهوائية، كما تمت دراسة تأثير تغير نسب الملح المضافة على الإيصالية الحرارية والمسامية للعينات.

تم اختبار الإيصالية الحرارية والمقاومة الميكانيكية والعزل الصوتي للعينات. وتم اختبار المسامية والكثافة الظاهرية وفقاً للمواصفة ASTM-C20-00 الخاصة بتحديد المسامية (للقرميد الأحمر والمواد المسامية الأخرى) وهي طريقة مختلفة عن الطرائق التقليدية المتبعة في تحديد الكثافة الظاهرية (وزن العينة وتحديد أبعادها..). هذا وقد اعتمدت في هذا البحث مفاهيم الهندسة الكسيرية (حصيرة سيرينسكي) لنمذجة البنية المسامية للعينة المدروسة وتحديد معامل التوصيل الحراري مع دراسة تغير الثابت التجريبي لدى ربط القيم النظرية بالتجريبية.

وتمت دراسة الحالة الجافة للعينات وتحديد الإيصالية الحرارية تجريبياً ونظرياً كخيارٍ جديدٍ يضاف إلى الحالة الرطبة المدروسة في أبحاثٍ سابقة، كما تم استنتاج صيغة تحدد معامل التوصيل الحراري في حالة الإشباع الكامل وهي أيضاً حالة لم تدرس مسبقاً.

¹ خرسانة إسمنتية عازلة: مفرغة، خلوية، مشبعة بالهواء

1-2 الخطوط العامة للرسالة

تتضمن الرسالة في الفصل الأول مقدمة شاملة تتخللها لمحة عن العزل الحراري (تعريفه، مزايا استخدامه، مسببات الرطوبة، طرائق انتقال الحرارة، تصنيف مواد العزل الحراري) مع التطرق إلى بعض المواد الخام المستخدمة في البناء والعزل ثم الدراسة المرجعية التي توضح آخر الأبحاث التي تتناول العزل الحراري وتصنيع الأيروجيل وتطبيقاته والخرسانة العازلة بالإضافة إلى الأبحاث التي تتعلق بتحديد معامل التوصيل الحراري حيث تتم فيها نمذجة الوسط المسامي في الحالة الرطبة وفق الهندسة الكسيرية مع التطرق إلى طرائق تحديد البعد الكسيري.

يتطرق الفصل الثاني إلى أهمية البحث وأهدافه، ويتخصص الفصل الثالث بالقسم العلمي حيث يتم فيه استعراض المواد والطرائق المستخدمة في تحضير العينات، والأجهزة المستخدمة لإجراء الاختبارات اللازمة للعينات (من إيصالية حرارية ومقاومة ميكانيكية ومعامل امتصاص الصوت واختبار الكثافة الظاهرية) والمعايير التي تعمل وفقها تلك الأجهزة.

يقدم الفصل الرابع نتائج الاختبارات والمناقشة، دراسة الوسط المسامي، حل جملة المعادلات لتحديد أبعاد الوسط، تحديد درجة الرطوبة، تحديد معامل التوصيل الحراري في الحالة الجافة وفي الحالة الرطبة، مناقشة ارتباط النتائج النظرية بالتجريبية لمعامل التوصيل الحراري، ويشير إلى أهم الاستنتاجات التي تم التوصل إليها، والتوصيات المقترحة للأبحاث المستقبلية المتعلقة بهذا البحث.

1-3 تعاريف ومفاهيم رئيسية

1-3-1 العزل الحراري

هو استخدام مواد لها خواص تساعد في الحد من تسرب الحرارة وانتقالها من داخل المبنى إلى خارجه شتاءً وبالعكس صيفاً، وذلك من خلال الجدران والأسقف والأرضيات. [3]

1-3-2 مزايا استخدام العزل الحراري

- هناك عدة مزايا تجعل لاستخدام العازل الحراري أهمية خاصة في إنشاء المباني ومن هذه المزايا ما يلي: [3]
- تخفيض الطاقة الكهربائية المستهلكة للتبريد والتدفئة.
 - تقليل سعة أجهزة التكييف والتدفئة وتكاليف صيانتها.
 - حماية مواد المبنى من تغيرات درجة الحرارة.

- حماية الأثاث داخل المبنى.
- رفع مستوى الراحة الحرارية في المبنى.
- حماية البيئة.

3-3-1 حماية المبنى

يعمل العزل الحراري على حماية مواد البناء من تغيرات الطقس الخارجية والتي تحدث نتيجة للفروق الكبيرة في درجات الحرارة خلال ساعات اليوم وتؤدي إلى حدوث إجهادات حرارية مستمرة على مواد البناء وحدوث تصدعات وشروخ فيها. [3]

يلعب الموقع الجغرافي للمبنى دوراً رئيسياً في اختيار العازل الحراري المناسب، لأن تعرض المبنى لأشعة الشمس شتاءً يقلل من احتياجات التدفئة، مما ينعكس على اختيار السماكة الاقتصادية للعازل الحراري المستخدم. إضافةً إلى المواد المستخدمة في العزل الحراري فإن هناك طرائقاً أخرى تساعد في عملية العزل الحراري، وتتعلق بتصميم المبنى نفسه ومنها ما يلي:

- استخدام الأسقف المستعارة في الأدوار العلوية.
- استخدام الزجاج المزدوج أو العاكس في جميع النوافذ وخاصة في الأماكن التي تتطلب مساحات كبيرة من الزجاج.
- زراعة الأشجار حول المبنى.
- عزل النوافذ باستخدام الستائر.

تؤثر الرطوبة ومياه الرشح سلباً على المباني وتساهم في تلف موادها الإنشائية والبنائية مما يؤدي إلى قصر عمر حياة المبنى (فساد الخشب المستخدمة وانحناءه، تعرض الحديد المستخدم للصدأ، تلف الدهان، تلف التمديدات الكهربائية، تكاثر الفطريات والبكتيريا في المبنى)، بالإضافة إلى الظروف غير الصحية التي قد يتعرض لها مستخدمو المبنى. [3]

4-3-1 المواد العازلة للرطوبة

مواد عازلة مرنة- الألواح المعدنية- البيتومين- السوائل العازلة- البولي ايثيلين- مواد عازلة نصف صلبة- الإسفلت- رقائق إسفلتية صغيرة- مواد عازلة قاسية- ألواح الإردواز- ألواح الاسبيستوس الصغيرة- ألواح خشبية صغيرة- ألواح الاسبيستوس الإسمنتي- طبقات البلاستيك-القرميد. [3]

5-3-1 آليات انتقال الحرارة في المادة العازلة

يتم قياس قدرة المادة على العزل الحراري، بمعامل التوصيل الحراري، فكلما قل المعامل دل ذلك على زيادة مقاومة المادة لنقل الحرارة والعكس صحيح، ومن هنا يتضح أن المقاومة الحرارية تتناسب عكسياً مع معامل التوصيل الحراري.

- **التوصيل الحراري:** يتم انتقال الحرارة من خلال جزيئات المادة نفسها حيث يرتفع معامل التوصيل الحراري للحديد إذا ما قورن بالمواد العازلة للحرارة مثل الفلين. [4]

- **الحمل الحراري:** يتم انتقال الحرارة بواسطة المائع المحيط بالمادة العازلة حيث تنتقل جزيئات الغاز أو السائل من المناطق الساخنة إلى المناطق الباردة حاملة الطاقة الحرارية معها، وبتصادم الجزيئات الساخنة مع الباردة تنتشر الحرارة خلال المادة. [4]

- **الإشعاع الحراري:** انتقال الحرارة بالإشعاع لا يتطلب وسيطاً مادياً أو حركة مائع وهي الطريقة التي تنتقل بها حرارة الشمس إلى الأرض. ويلاحظ أن المواد العاكسة تعتبر مواداً فعالة في العزل الحراري لقدرتها العالية على رد الإشعاعات والموجات الحرارية بشرط أن تقابل فراغاً هوائياً وتزداد قدرة هذه المواد على العزل بزيادة لمعانها وصلقلها. [4]

6-3-1 الإيصالية الحرارية

هي مقدار التدفق الحراري المار باتجاه عمودي على سطح مادة مساحتها متراً مربعاً واحداً، وسماكتها متراً واحداً بفعل فرق في درجة الحرارة بين سطحيها مقداره درجة واحدة ويقاس بـ $W/(m \cdot K)$. [4]

7-3-1 معامل الانتقال الحراري الإجمالي

هو مقدار التدفق الحراري، المار عمودياً عبر وحدة المساحة لعنصر إنشائي بفعل فرق في درجة الحرارة مقداره درجة واحدة بين درجة حرارة الهواء داخل المبنى وخارجه، ووحدة قياسه $W/(m^2 \cdot K)$ ، إن معرفة معامل انتقال الحرارة الإجمالي ضرورية لحساب الطاقة الحرارية المفقودة أو المكتسبة من خلال العنصر الإنشائي، حيث أنه كلما قلت قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي زادت قدرة العزل الحراري وارتفعت نسبة التوفير في الطاقة. [5]

ولمعرفة المقاومة الكلية للانتقال الحراري لا بد من جمع المقاومات المختلفة لطبقات الحائط أو السقف بما فيها مقاومة الطبقة الهوائية الملاصقة للأسطح الداخلية والخارجية. وجمع هذه المقاومات يشبه تماماً جمع

المقاومات الكهربائية، فهي إما أن تكون على التوازي أو التسلسل، ويعتمد هذا على توضع المواد في السقف أو الجدار.

8-3-1 خصائص العازل الحراري

- **الكثافة:** لا بد من معرفة كثافة مواد العزل الحراري لإجراء الحسابات الإنشائية لعناصر المباني المختلفة.
- **امتصاص الرطوبة:** إن وجود الماء في الحالة الرطبة (بخار الماء) أو السائلة أو الصلبة في المادة العازلة يقلل من قيمة العزل الحراري للمادة، أي يقلل المقاومة الحرارية كما أنه قد يساهم في حدوث تلف المادة على نحو سريع، ويعتمد تأثير الرطوبة على المادة على خواص تلك المادة من حيث قدرتها على الامتصاص والنفذية.
- **الاحتراق والاشتعال:** يجب اتخاذ الاحتياطات اللازمة بعدم تعرض المادة العازلة للاحتراق والاشتعال.
- **مقاومة الانضغاط:** يجب أن تقاوم المادة العازلة الضغوط التي تتعرض لها خلال عمرها التشغيلي من دون حدوث تهشم أو تشوه لها أو فقدان لأي من خصائصها التشغيلية الأخرى. تتميز بعض المواد العازلة بمتانة وقدرة عالية على التحمل ومن الممكن استخدامها للمساهمة في دعم وتحميل المبنى، وذلك إضافة لهدفها الأساسي وهو العزل الحراري. [6]
- **تأثير العوامل الجوية:** تؤثر العوامل الجوية كالأمتار ودرجة الحرارة ونسبة الرطوبة والرياح وغيرها على أداء المادة وعلى عمرها التشغيلي، وبالتالي تحديد درجات الحرارة التشغيلية القصوى والدنيا للمادة العازلة.
- **استرجاع الأبعاد:** يجب معرفة قدرة العوازل شبه الجاسئة أو المرنة على استرجاع أبعادها الأصلية إذا ما تعرضت مؤقتاً لأحمال ضاغطة. [6]
- **الالتصاق:** وهي من الخصائص المهمة التي يجب توفرها في المواد الرغوية العازلة للحرارة المنفذة بالطلاء أو الرش على السطوح وقدرتها على الالتصاق.
- **الانكماش:** تكمن أهمية هذه الخاصية في تحديد مدى انكماش المادة، وتأثير ذلك على حجمها وخصائصها الحرارية، ومدى إمكانية حدوث التشققات فيها بعد جفافها. [6]
- **عامل الأمان وإجراءات السلامة:** يكون لبعض المواد العازلة خواص معينة منها ما قد يعرض الإنسان للخطر سواء وقت التخزين، أو أثناء النقل أو التركيب، أو خلال فترة الاستعمال، فقد تتسبب في إحداث عاهات في جسم الإنسان دائمة أو مؤقتة كالجروح والبثور والتسمم والالتهابات الرئوية أو الحساسية في الجلد والعينين، مما يستوجب أهمية معرفة التركيب الكيميائي للمادة العازلة، كذلك صفاتها الفيزيائية الأخرى من حيث قابليتها للاحتراق..

- **الجدوى الاقتصادية من استخدام العازل الحراري:** تلعب الجدوى الاقتصادية من استخدام العازل الحراري دوراً هاماً علاقة ذلك بالتكلفة التشغيلية من تكلفة وقود وصيانة دورية وعدد ساعات التشغيل لأجهزة التدفئة والتبريد، مع دراسة التكلفة الاقتصادية للمادة العازلة لمعرفة إمكانية استخدامها من عدمه، لاسيما عند ارتفاع سعرها.
- **جودة تصنيع العازل الحراري.**
- **العزل الصوتي:** بعض المواد العازلة للحرارة قد تستخدم لتحقيق المتطلبات الصوتية مثل امتصاص الصوت أو تشتيته وامتصاص الاهتزازات لذا فإن معرفة الخواص المرتبطة بهذا الجانب قد يحقق هدفين بوسيلة واحدة نتيجة لاستخدام تلك المواد، وهما العزل الحراري والعزل الصوتي.
- **الإيصالية الحرارية:** يجب أن تتمتع المواد العازلة للحرارة بمعامل توصيل حراري منخفض (إيصالية حرارية منخفضة) للحد من تسرب وانتقال الحرارة من خارج المبنى إلى داخله شتاءً والعكس صيفاً. إضافة إلى كل الخصائص التي ذكرت سابقاً، يكون من الضروري عند اختيار المادة العازلة المناسبة معرفة إمكانية استعمالها مراتٍ عديدة، وانخفاض تكلفة تطبيقها، ومقاومتها للتفاعلات الكيميائية وتوفير المهارات اللازمة لتشغيلها. [6]

9-3-1 أهم الاعتبارات التي يجب مراعاتها عند تطبيق العزل الحراري

- أن تخزن المواد العازلة في أماكن جافة غير مكشوفة.
- يراعى تغطية أسطح المواد العازلة من الجانبين بوضع حاجز فاصل (غلاف) من أعلاها وحاجز (غلاف) مقاوم لتسرب المياه من أسفلها أو العكس بالعكس، وذلك حسب طريقة التركيب المناسبة لذلك.
- تجنب إمكانية تهشم المادة العازلة عند البناء أو خلال عملية التركيب.
- أن تكون جميع أسطح المادة العازلة خالية من الغبار أو الشحوم قبل تركيبها.
- في المباني الخفيفة كالمخازن وغيرها، التي تستعمل الصفائح المعدنية في تصنيع أسقفها وجدرانها، من الضروري استعمال الصوف الزجاجي أو الصخري للعزل الحراري لمقاومتها للحريق والحرارة. [6]

10-3-1 تصنيف المواد العازلة للحرارة وفقاً للتركيب والبنية والشكل

1-10-3-1 التصنيف حسب التركيب الكيميائي

تقسم المواد العازلة وفقاً لهذا التصنيف إلى مجموعتين رئيسيتين:

- مواد عضوية عازلة للحرارة.
- مواد غير عضوية عازلة للحرارة.

2-10-3-1 التصنيف حسب البنية

يتميز هذا التصنيف بأربع مجموعات تختلف في طبيعة تركيب الفراغات، وهي:

a. مواد ذات تركيب ليفي

- 1- ألياف معدنية
 - الألياف الزجاجية- الألياف الصخرية- الألياف الأسبستوسية
- 2- ألياف غير معدنية
 - الصوف الطبيعي- الألياف النباتية- الألياف الاصطناعية- اللباد [6]

b. مواد ذات تركيب خلوي

- 1- مواد خلوية غير عضوية
 - الزجاج الرغوي- الطين - الخرسانة الرغوية- الخرسانة الخلوية
- 2- مواد رغوية عضوية
 - البولسترين المقلوب - البولتسرين المبتوق- البوليوريثان - الفينول الرغوي

c. مواد ذات تركيب مسامي

- 1- مواد مسامية طبيعية
 - الخشب بأنواعه- القش- القصب - الحجارة البركانية - البيرلايت الممدد
- 2- لدائن مسامية

d. مواد ذات تركيب رقائقى - قشري: الفيرميكيولايت - الميكا

3-10-3-1 التصنيف حسب الشكل النهائي للعازل

اتجهت صناعة المواد العازلة للحرارة إلى إنتاج عوازل حرارية بأشكال متعددة حيث يمكن أن تأخذ أحد الأشكال النهائية التالية:

A. الألواح الصلبة

تستخدم هذه الألواح في الجدران والأسقف والأرضيات بسماكات معينة مع مراعاة خصائص المادة العازلة والظروف التشغيلية التي سوف تتعرض لها. ومن هذه الألواح ألواح الصوف الصخري وألواح البولستيرين الجاسئة المبينة بالشكل (1-1). [6]



الشكل (1-1) ألواح البولستيرين الصلبة

B. الألواح شبه الصلبة أو المرنة

تستخدم في المناطق غير المعرضة لأي أحمال مثل الأسقف المعلقة نظراً لعدم قدرتها على مقاومة الأحمال الواقعة عليها، ومن هذه الألواح الصوف الزجاجي المبينة بالشكل (2-1) والبولي أوريثان المرن. [6]



الشكل (2-1) ألواح الصوف الزجاجي شبه الصلبة

C. العوازل السائبة واللينة

تستعمل هذه العوازل في تعبئة الفجوات والفراغات في الجدران كما تستخدم في الأسقف والأرضيات. لذا يجب أخذ الاحتياطات اللازمة لعدم تعريضها إلى أية أحمال تغير من خصائصها وكفاءتها في العزل الحراري. مثل حبيبات البيرلايت السائبة وحبيبات البولستيرين السائبة والتربة الخفيفة. [6]

D. العوازل الرغوية والمنفذة بالحقن

تستعمل هذه العوازل في تعبئة الفراغات والفجوات في الجدران المزودة وفي الأماكن غير منتظمة الشكل، كما هو مبين بالشكل (3-1)، على أن تراعى نظافة السطوح والأحوال الجوية السائدة على سبيل المثال البولي أوريثان المطبق بالحقن. [6]



الشكل (3-1) البولي أوريثان المطبق بالحقن

E. الخرسانة الخفيفة

تستعمل الخرسانة الخفيفة بأنواعها الرغوية أو ذات الركام الخفيف الوزن في عزل الأسقف والأرضيات وتعبئة الفراغات والفجوات في الجدران المزودة وفي صناعة القطع البنائية مثل القرميد الخفيف المفرغ أو المصمت

11-3-1 بعض المواد العازلة للحرارة ومميزاتها

A. الأيونات الممدد

وهي مادة مطاطية ممددة معالجة بالكبريت ويستعمل غاز النتروجين في عملية التمدد، تصنع هذه المادة على شكل ألواح وتستخدم كعازل حراري بسبب رداءة توصيلها للحرارة.

B. البولي إيثيلين الخلوي

يبين الشكل (4-1) المظهر الخارجي لمادة البولي إيثيلين الخلوي الذي يعتبر من أحدث المواد اللدائنية العازلة للحرارة، والتي يتطلب استعمالها حماية ضد الحريق بسبب قابليتها للاشتعال. [6]



الشكل (4-1): البولي إيثيلين الخلوي

C. الفلين الممدد

يعتبر من المواد العضوية الطبيعية العازلة للحرارة، ويتم إنتاجه على شكل ألواح جاسئة من لحاء شجر السنديان الفليني، حيث تمتاز المادة الخام بتركيبها المسامي المحكم ضد نفاذ الماء لأن خلاياها مغطاة بطبقة شمعية. يعتبر الفلين من المواد الخاملة كيميائياً ومقاوم للأحماض المخففة والقلويات، كما أنه لا ينصهر ولا يشتعل ولا تصدر عنه أبخرة سامة عند الاحتراق، ولكن هذه المادة تتأثر بالرطوبة وعوامل الطقس الخارجية لذا يراعى عدم استخدامها كمادة عازلة للرطوبة. [6]

D. الفلين الخام

هو لحاء الطبقة الخارجية لخشب شجرة البلوط دائمة الخضرة وله بناء خلوي ذو إيصالية حرارية منخفضة. [6]

E. الألياف الخشبية (رقائق ليفية قصبية)

تصنع من الخشب الطري، حيث تعالج العجينة الخشبية بالحرارة بعد مزجها بمواد معينة كألياف قصب السكر وشطايا الورق لتحويلها إلى نسيج ليفي، ثم يتم تجفيفها بالهواء الساخن لتخرج على شكل ألواح جاسئة تفيد في العزل الحراري. ومن مساوئها تأثرها بالرطوبة لذا يجب استخدام مادة عازلة للرطوبة معها.

F. المواد السيلوزية العازلة للحرارة

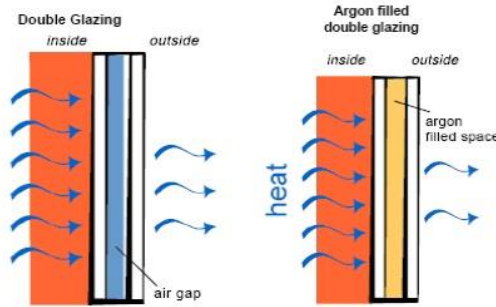
تصنع من نفايات المنتجات الورقية ومن ورق الجرائد أو الصحف القديمة، حيث يتم تقطيع المواد الأولية وطحنها وإضافة بعض المواد الكيماوية مثل كبريتات الكالسيوم أو البوراكس أو حمض البوريك وذلك لتخفيض امتصاصيتها للماء وإعاقتها للاشتعال. ومن مساوئها أنها عندما تحترق ينتج عنها غاز CO وهو من الغازات السامة، ويجب مراعاة عزل هذه المادة من الرطوبة.

G. الصوف الصخري

تتم صناعته من الصخور الطبيعية أو من خبث الحديد أو النحاس أو الرصاص. تتميز مادة الصوف الصخري بمقاومة عالية للحريق وقدرة عالية على عزل الصوت ويُعيبها قابليتها العالية لامتصاص الماء والرطوبة والمقاومة الضعيفة جداً للانضغاط والمضار الصحية الناتجة عن استخدامها.

H. الزجاج المضاعف

تحدُّ النوافذ ذات الزجاج المضاعف من فقدان الطاقة بسبب وجود الفراغ الهوائي بين لوحَي الزجاج، كما هو مبين في الشكل (5-1)، هذا ويمكن ملء الفراغ بين لوحَي الزجاج في حالة الزجاج المضاعف بغاز الأرجون، لأنه ناقل رديء للحرارة بشكل أكبر مقارنة بالهواء وبذلك تتحسن فعالية عزل النافذة.



الشكل (5-1) بعض أنواع الزجاج المضاعف المستخدم في العزل الحراري

أ. الصوف الزجاجي

تتألف المواد الأولية لصناعة الصوف الزجاجي أو الزجاج اللين من الرمل والصودا وبعض الإضافات الأخرى التي تستخدم كمواد رابطة. ويتميز الصوف الزجاجي بمقاومته الكبيرة للاحتراق وقدرته على عزل الصوت وله معامل امتصاص ماء ورطوبة عالي وقوة تحمل للضغط منخفضة جداً كما هو مبين في الشكل (6-1). [6]



الشكل (6-1) طريقة استخدام الصوف الزجاجي في العزل الحراري

ل. البوليستايرن الممدد (البوليستايرن المشكل بالقولبة) Expanded or Molded

Polystyrene

يتم تصنيع هذه المادة من البوليستايرن الحبي الممدد على ثلاث مراحل، وهي مرحلة التمدد الأولي للحبيبات، ثم مرحلة انضاج الحبيبات الممددة، ثم أخيراً مرحلة القولبة على شكل ألواح، كما هو مبين في الشكل (7-1).



الشكل (7-1) البوليستيرين الممدد

K. البوليستايرين المشكل بالبتق Extruded Polystyrene:

يمتاز البوليستايرين المشكل بالبتق بتركيبه الخلوي بدرجة عالية من التجانس وبخلاياها المغلقة وينصح باستخدامه في المناطق المعرضة للماء أو الرطوبة من دون الحاجة لاستخدام مواد عازلة للماء أو الرطوبة. [6]

L. السيتروفوم (البوليستايرين الرغوي)

تم استخدام السيتروفوم (البوليستايرين الرغوي) من أجل العزل الحراري للمباني بطريقة الحقن عبر طبقات الجدار، كما هو مبين في الشكل (8-1)، يتمتع السيتروفوم بمقاومة ميكانيكية عالية ومقاومة منقطعة النظر لاختراق الماء، كما يمتاز بأنه صلب ومتمين وخفيف الوزن ومقاوم للتحطم مع استمرارية في العمل.



الشكل (8-1) البوليستيرين الرغوي المستخدم في العزل الحراري

M. الغرانيت

يتكون الغرانيت من الكوارتز والفلسبار وكميات مختلفة من الميكا ويمتاز صخر الغرانيت بمتانته العالية ومقاومته للتآكل ومساميته المنخفضة، كما يمتاز بحسن منظره، إلا أنه باهظ التكاليف.

N. الخشب

تتصف الأخشاب بالمتانة العالية وانخفاض كثافتها وقدرتها على العزل الصوتي والحراري ومقاومتها العالية للصقيع ولتأثير العديد من المواد الكيميائية، ومن مساوئها امتصاصها للرطوبة والتسوس والتآكل والقابلية للاحتراق، لذلك تستخدم مادة أخرى عازلة للرطوبة مع الخشب.

O. المطاط الصناعي

تم استخدام المطاط الصناعي المستخدم في صناعة إطارات السيارات كعازل حراري، حيث يتم طحنه وكبسه بشكل ألواح لاستخدامه كعازل حراري أيضاً.

P. البيرلايت

يستعمل البيرلايت لعزل الجدران الخارجية وفي عزل الأسقف. يتم إنتاج حبيبات البيرلايت الممدد بكثافات تتراوح ما بين $(240 - 35) kg/m^3$ ، وتحتوي المادة على مسامات مفتوحة مملوءة بالهواء فهي عرضة لامتصاص الماء بنسب عالية، ولذلك يتم أحياناً معالجتها بمادة السليكون للتقليل من عملية امتصاص الماء والرطوبة.

البيرلايت هو الاسم العلمي للصخر الزجاجي البركاني و الذي يحتوي على مركب المئات المتحد، حين يتعرض إلى درجة حرارة التلين (870 درجة مئوية تقريباً) ليتخلص من جذر المئات المتحد لينتفخ من أربعة إلى عشرين مثل الحجم الأساسي مكوناً حبيبات البيرلايت المنتفخة تتمتع حبيبات البيرلايت السوري المنتفخة بخواص فيزيائية و كيميائية قل ما تتمتع بها أي مواد أخرى، كما هو موضح في الشكل (1-9). [6]



الشكل (1-9) حبيبات البيرلايت المستخدمة في العزل الحراري

Q. مادة البولي فينيل كلوريد (P.V.C)

هي عبارة عن مادة كيميائية بوليمرية من البلاستيك الحراري لونها أبيض وهي مادة متماسكة وصلبة. [6]

R. اللباد (ألياف غير معدنية)

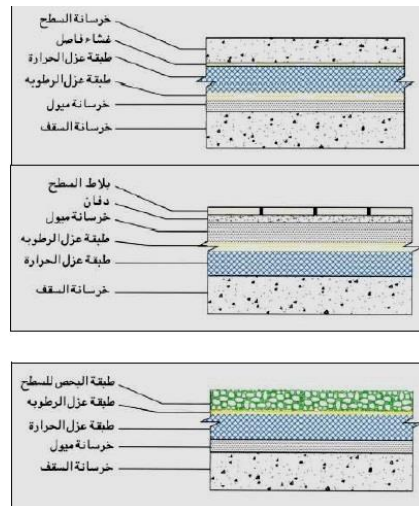
يتواجد على شكل لفائف طويلة وسماكات مختلفة، يمكن أن يكون مغلفاً بالورق أو برفائق معدنية أو مغلفاً بالورق المغطى بالأسفلت أو البيتومين ليعمل كحاجز للرطوبة وهو حالياً قليل الاستخدام. يوضع اللباد على الحائط الداخلي للبناء، غالباً ما يستخدم في عزل الأسقف والجدران. [6]

12-3-1 طرائق العزل الحراري

1-12-3-1 عزل الأسطح

A. نظام السطح التقليدي

تكون طبقة العازل المائي فوق طبقة العازل الحراري لحماية العازل الحراري من الماء وخاصة مواد العزل الحراري التي تكون فيها نسبة امتصاص الماء مرتفعة نسبياً كما هو موضح في الشكل (1-10)، وفي هذا النظام يتعرض الغشاء العازل للماء (العازل المائي) إلى الاجهادات الحرارية المتواصلة والناجمة عن التفاوت الكبير في درجات الحرارة بين الليل والنهار وبين فصول السنة المختلفة والتي تؤدي إلى تمدد وتقلص هذا الغشاء مما يفقده مرونته وإلى إجهادات ميكانيكية أثناء التركيب أو بعده، نتيجة وجود بعض أجهزة التكيف وغيرها وأعمال الصيانة على سطح المبنى، وبالتالي يقل العمر الافتراضي للعازل المائي وتزداد تكاليف الصيانة. [7]

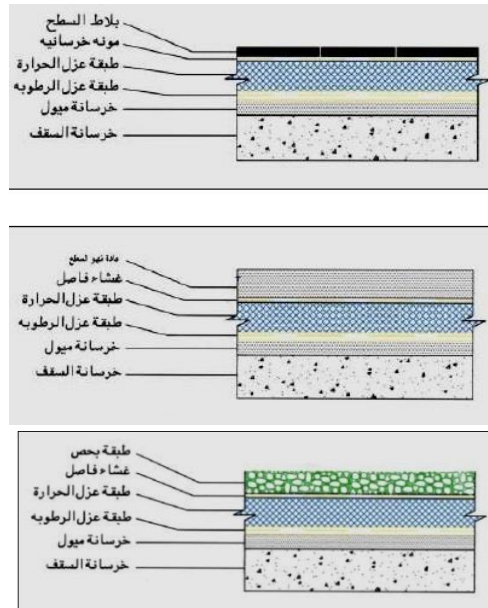


الشكل (10-1) نظام العزل للسطح التقليدي

B. نظام السطح المقلوب

والذي يكون فيه العزل الحراري فوق طبقة العازل المائي كما هو موضح بالشكل (1-11)، ويقوم العازل الحراري بحماية العازل المائي من الإجهاد الحراري والتعرض للأشعة فوق البنفسجية وكذلك الإجهاد الميكانيكي

أثناء التركيب وبعده وعليه يزيد العمر الافتراضي لغشاء العزل المائي، وبالتالي تتخفض تكاليف الصيانة بدرجة كبيرة.



الشكل (11-1) نظام السطح المقلوب في العزل

ولكي يتاح استخدام نظام السطح المقلوب، يجب أن تكون مادة العزل الحراري ذات مقاومة كبيرة لامتصاص الماء والرطوبة. [7]

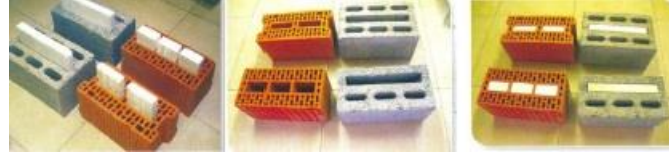
2-12-3-1 عزل الجدران الخارجية

توجد أربعة أنواع من الأنظمة التي تستخدم في عزل الجدران الخارجية للمباني وهي:

A. النظام الأول

ويعرف بنظام الجدار الواحد للمبنى من القرميد الأحمر أو القرميد الإسمنتي كما هو موضح بالشكل (1-12)، والذي توضع في داخله شرائح متوازية الأضلاع من العزل الحراري مثل البولسترين المبتوق أو الممدد أو الصوف الصخري وغيرها، وفي هذا النظام يوجد نوعين من الجسور الحرارية التي نصنفها كالتالي:

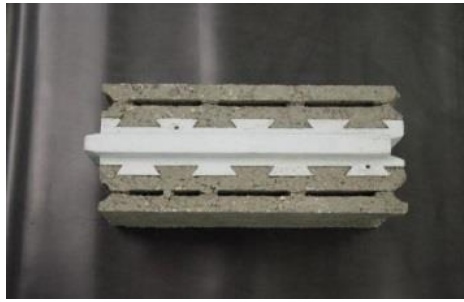
- الجسور الحرارية الناتجة عن الأجزاء الموصلة بين نهايتي جسم البلوك.
- الجسور الحرارية الناتجة عن استخدام المونة الإسمنتية بين البلوك أثناء التركيب وهذه الجسور تسيء إلى نظام العزل.



الشكل (12-1) نظام الجدار الواحد

B. النظام الثاني

وهو نظام الجدار الواحد المعزول بشريحة واحدة من مادة البولسترين الميثوق أو الممدد كما هو موضح بالشكل (13-1)، وفي هذا النظام توجد جسور حرارية ناتجة عن استخدام المونة الإسمنتية بين البلوك أثناء التركيب وعليه فهو أفضل من النظام الأول. ولكن نسبة تسرب الحرارة في هذا النظام قد تصل إلى 49% تقريباً نتيجةً لوجود هذه الجسور الحرارية السابقة الذكر (المونة الإسمنتية).



الشكل (13-1) نظام الجدار الواحد المعزول بشريحة واحدة من مادة البولسترين الميثوق أو الممدد

C. النظام الثالث

وهو النظام التقليدي، ويعتبر الحل الأفضل في عزل الجدران، وفي هذا النظام يتم بناء جدارين متوازيين، بحيث تتركب أنواع العزل الحراري بين فراغ الجدارين كما هو موضح بالشكل (14-1)، حيث تفصل هذه الألواح بين الجدار الخارجي والجدار الداخلي للمبنى بشكل كامل وتلغى الجسور الحرارية الموجودة في الأنظمة السابقة الذكر، ويؤخذ في الاعتبار عامل التكلفة والصيانة، وكذلك الجسور الحرارية الموجودة في الممرات والأعمدة التي لا تغطيها المادة العازلة للحرارة في الجدران الخارجية. [7]



الشكل (14-1) النظام التقليدي: نظام الجدارين المتوازيين

D. النظام الرابع

وهو نظام العزل من الخارج حيث يتم تثبيت العوازل الحرارية على الجدران الخارجية للمبنى وبحيث يتم تغليفه تماماً كما هو موضح بالشكل (1-15)، وفي هذا النظام يتم التغلب على جميع الجسور الحرارية. وهو النظام الوحيد الذي يعزل الأعمدة والجسور ويلغي عملها كجسور حرارية، ولكن يجب مراعاة التكلفة الإجمالية لهذا النظام. [7]



الشكل (1-15) تثبيت العوازل الحرارية على الجدران الخارجية للمبنى

3-12-3-1 عزل الجدران الداخلية

يمكن استخدام نظام العزل من الداخل في المباني ذات التشطيب الخارجي الخاص أو في عزل المباني المبنية مسبقاً وغير المعزولة حرارياً كما هو موضح بالشكل (1-16)، وفي هذا النظام يمكن تركيب ألواح العزل الحراري على جميع الجدران الداخلية المواجهة للمحيط الخارجي. [7]



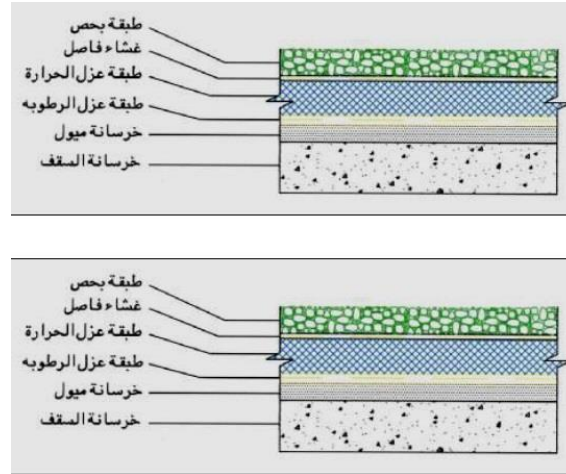
الشكل (1-16) نظام العزل من الداخل

4-12-3-1 عزل الأرضيات

قد تصل درجة حرارة التربة على عمق 3 أمتار إلى 33°C تقريباً. وعليه فإن عزل الأرضيات هام جداً، كما هو موضح بالشكل (1-17) ويجب أن تتوفر في مادة العزل الحراري للأرضيات شروط أساسية وهي:

- أن تتحمل قوى انضغاطية عالية.

- أن تكون مقاومة لامتناس الماء والرطوبة بالإضافة إلى انخفاض اصاليتها الحرارية.



الشكل (1-17) عزل الأرضيات

4-1 لمحة عن بعض مواد العزل والبناء

1-4-1 مقدمة

تتميز القشرة الأرضية بتنوع الصخور المكونة لها وتعدد تركيبها الكيميائي حيث تضم أكثر من 100 عنصر حيث تتحد هذه العناصر مع بعضها لتؤلف خامات معينة بشروط معينة وفق الجدول رقم (1-1) [8]:

جدول (1-1) نسبة العناصر الكيميائية المكونة للقشرة الأرضية [8]

النسبة %	الرمز الكيميائي	العنصر
47.61	O	الأكسجين
27.69	Si	السيليسيوم
8.1	Al	الألمنيوم
7.3	Fe	الحديد
4.15	Ca	الكالسيوم
2.75	Na	الصوديوم
2.59	K	البوتاسيوم
2.08	Mg	المغنزيوم

هذه الخامات عبارة عن مواد بلورية ذات تركيب منتظم باستثناء بعضها، ويعد الأكسجين والسيليسيوم من

أهم العناصر فيها.

1-4-2 الحجر الكلسي (كربونات الكالسيوم)

هو صخر رسوبي، وجد متوضعا في اليابسة على شكل جبال أو تلال أو متناثرا في التربة أو في البحار محلولاً أو طحلاً، وبمرور الزمن وتحت تأثير الحرارة العالية والمستمرة انهارت هذه الأحجار نتيجة تحوّلها إلى كتل هشة ذات كثافة منخفضة، ولدى تماسها مع مياه الأمطار تحوّلت إلى ما يشبه اللّين ناشرةً للحرارة ومعطيةً ما يسمى بلبن الكلس الذي أدى إلى ربط الأحجار المتبقية والكلس هو من الصخور الرسوبية، تشكّل بطرائق عضوية، ويتكوّن من شوائب السيليكا، والحجر الكلسي النقيّ لونه أبيض و لكن قد يتواجد بألوانٍ متعدّدة، منها الأصفر و الرمادي، نظراً لوجود بعض الشوائب مثل الرمل وأكسيد الحديد و الغضار، ويكون إجمالاً بشكل حبيبات ناعمة أو خشنة و أحياناً بشكل عروق. يُعرف بانخفاض قساوته، ويتواجد بنسب كبيرة في القشرة الأرضية، وهو من أشهر الخامات المعدنية، بل ومن أهمّها. [9]

استخدم قدماء المصريين الحجر الكلسي في بناء الأهرامات، وكذلك الرومان، وبعد مرور آلاف السنين تمكن الإنسان من استخدام المركبات الكلسية (كلس محروق، هيدرات كلسية) كمواد رابطة. تظهر كربونات الكالسيوم (الكالسيت) بشكل صخور مشكلة في جميع الأشكال الجيولوجية، وتشارك الصخور الكلسية بنسبة (22%) في مكونات القشرة الأرضية، كما يحتل الحجر الكلسي المركز الثالث من بين العناصر التي تولّف القشرة الأرضية بعد المركبات الغضارية والرمل.

تعتمد معظم الدول العربية على الحجر الكلسي في البناء، و خاصة الأردن وفلسطين وتحديداً في الضفة الغربية، حيث يعالج بعد استخراجها، ثم يتم تصديره، و يُعتبر حجر القدس من أهمّ أنواع هذا الحجر. [9] تعد الجمهورية العربية السورية بلداً غنياً بالأحجار الكلسية حيث اشتهرت مدينة دمشق والمنطقة المحيطة بها بوجود أفران تقليدية مخصصة لإنتاج مادة الكلس على مدى قرونٍ عديدة، ومن أهم استخداماته:

- يستخدم بشكل أساسي في صناعة (الإسمنت البورتلندي).
- يدخل في صناعة كربونات الصوديوم و خاصة اللامائية أو (رماد الصودا).
- يستخدم كمادة مساعدة تستعمل في المصاهر الخاصة بالحديد والفولاذ.

1-4-3 الغضار (CLAY)

الخامات الغضارية هي إحدى أهم الخامات الطبيعية الموجودة في الجمهورية العربية السورية، حيث تتواجد هذه الخامات في مناطق شاسعة تمتد من محافظة الحسكة في أقصى الشرق إلى محافظة حلب لأقصى الشمال ثم إلى محافظة درعا أقصى الجنوب مروراً بمحافظتي حمص ودمشق في وسط البلاد. هذه الخامات منتشرة بكميات كبيرة مما يسهل إمكانية استخدامها ويقلل كلفة استخراجها ونقلها إلى المناطق الصناعية.

يُعتقد أن الخامات الغضارية ستكون من مواد القرن الحادي والعشرين بسبب توفرها ورخصها بالإضافة إلى كونها صديقة للبيئة (مادة طبيعية وقادرة على الاتحاد مع الشوائب الملوثة)، وتأتي أهمية الغضار المستقبلية من خلال الاستفادة من البنية البوليميرية للغضار.

إن أصل كلمة الغضار (CLAY) هو من (clay) وهي الأرض اللزجة المتصلبة، لا يوجد تعريف موحد للغضار والخامات الغضارية، حيث عرّفت لجنة الأسماء التعريفية المشتركة الغضار بأنه مادة طبيعية تم تشكيلها من خامات أولية نقية تصبح مرنة عندما تمزج مع الماء وصلبة بمرور الزمن أو عند التجفيف أو الحرق.

- بنويًا: بناء بلوري يتكون من ارتباط الشوارد مع بعضها البعض عن طريق روابط كيميائية شاردية ومشاركة وروابط فيزيائية (فاندرالس).
- جيولوجياً: توضع رسوبية حطامية أو صخرية متبقية ناتجة من عوامل التعرية لصخور مختلفة ضمن شروط جيولوجية وجوية خاصة مترافقة مع خامات أخرى بأحجام وأشكال حبيبة مختلفة مثل الزيوليت والكوارتز وأكاسيد معدنية. [8]
- كيميائياً: هو بوليمير تعرض لتغيرات بنوية عديدة للطبقات ذات التراكيب المتماثلة مشكلة تجمعات، حيث يلاحظ في السلاسل البوليميرية وجود تحولات جوهريّة ضمن الطبقات، والتكرار الطبيعي للطبقات يتفاوت وفق عدد الطبقات التي تدخل في السلسلة المتكونة. وحسب كيمياء السيليسيوم: الغضار هو سيليكات ورقية أو ليفية. [8]

4-4-1 الطين الأحمر

الطين الأحمر هو أحد مخلفات الإنتاج عند إجراء المعالجة الفيزيائية والكيميائية للبوكسيت من أجل استخلاص الألمنيوم. يمتص الطين المركبات الشائبة لمركبات الألمنيوم المرافقة للبوكسيت يتغير تركيب القرميد الأحمر مع تغير مصدر البوكسيت، ومع تغير كمية الألومينا التي يمكن أن تستخلص منه. يتكون الطين الأحمر بشكل أساسي من رمل خشن وجزيئات دقيقة من الطين) وتكون قيمة PH في المجال (13-14) ويمكن إنتاج الطين الأحمر بثلاثة طرائق: طريقة التليد، طريقة الدمج، طريقة براير (Brayer). [10]

5-4-1 الإسمنت

مادة لها خاصية التماسك والالتصاق وتتكون من ذرات ناعمة جداً إذا أضيف إليها الماء شكلت ملاطاً (عجينة) قابلاً للتجمد والتصلب، يتم هذا التجمد في الهواء أو في الماء. وإذا مزج الرمل مع الإسمنت والماء نحصل على المونة الإسمنتية والمونة الإسمنتية لا تحتاج إلى مقاومة ميكانيكية عالية كالبيتون.

بلغ الانتاج العالمي من الإسمنت عام 2014 أربعة مليارات طن وهو يهيمن على صناعة التشييد حول العالم كمادة اقتصادية يسهل الحصول عليها والتعامل معها.

لمحة تاريخية: بنى المصريون القدماء أهراماتهم باستخدام الجبس المتكلس، واستخدم اليونانيون والرومان الكلس الناتج عن تكليس الحجارة بعد مزجه بالرمل والماء لربط حجارة البناء كمدرج روما. ومن أجل المنشآت تحت الماء، لجأ الرومان إلى مزج الكلس مع الرماد البركاني أو مسحوق الغضار المشوي حيث يتحد الكلس مع السيليكات والالومينات النشطة في الرماد والغضار فتمكنوا من الحصول على الرابط المائي الذي يتصلب ضمن الماء فشكّلوا الإسمنت البوزولاني - نسبة إلى قرية بوزولي الواقعة قرب بركان فيزوف الذي أخذ منه هذا الرماد، تدهورت صناعة الإسمنت بعد سقوط الامبراطورية الرومانية حتى أواخر القرن الثامن عشر.

في العام 1828 قام جوزيف اسبين بصناعة الإسمنت البورتلاندي في انكلترا حيث قام بتسخين مسحوق ناعم من الأحجار الكلسية إلى حرارة عالية فتفاعلت مع الغضار حتى تفككت الأحجار الكلسية معطيةً بعد طحنها بشكل دقيق ومزجها بالماء كتلةً صلبةً، أطلق عليها الإسمنت البورتلاندي وسمي هذا النوع من الإسمنت بهذا الاسم ذلك لأنه عندما يتصلب يأخذ شكل الصخر الطبيعي الموجود في جزيرة بورتلاندي بانكلترا. لكن اسحق جونسون في العام 1845 هو الذي حدد نسب المواد الخام المستعملة وكذلك درجة حرارة الشوي لذلك يعتبر هو من اخترع الإسمنت البورتلاندي. [11]

لم تتغير مكونات الإسمنت كثيراً وإنما تم التعديل على نسب هذه المكونات وتطورت عمليات التصنيع تدريجياً حتى أصبح الإسمنت المادة الرائدة في البناء في معظم الدول، و من أهم العوامل التي ساعدت على انتشار صناعة الإسمنت في جميع أنحاء العالم هو توفر المكونات اللازمة لذلك.

يعتمد مبدأ تصنيع الإسمنت على تسخين الأحجار الكلسية المطحونة والغضار وأكاسيد السيليكون والألومنيوم والحديد إلى درجة حرارة 1450 مئوية (والتي تعتبر العملية الأهم والأكثر كلفةً في صناعة الإسمنت) حتى تندمج وتتفاعل معطيةً كتلاً يتم تبريدها وطحنها وإضافة كمية من الجبس إليها للحصول على الإسمنت الذي نعرفه. [11]

1-5-4-1 المكونات الأساسية للإسمنت البورتلاندي

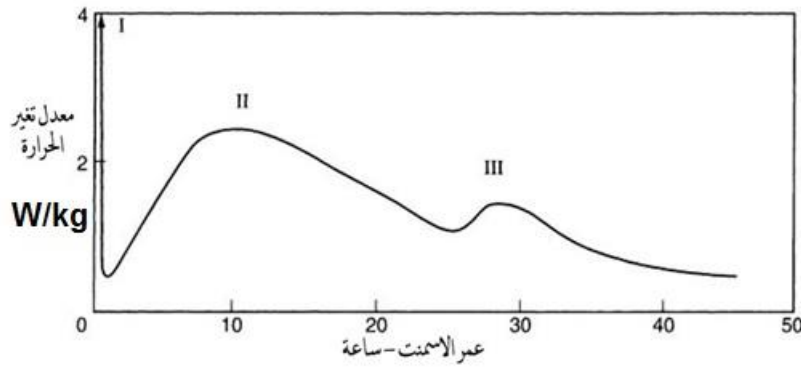
- 1- سيليكات الكالسيوم الثنائي
- 2- سيليكات الكالسيوم الثلاثي
- 3- ألومينات الكالسيوم الثلاثي
- 4- ألومينات الكالسيوم الرباعي الحديدية

1-4-5-2 إماهة الإسمنت وتصلبه

لاتتفاعل مكونات الإسمنت إلا في وسطٍ مائيٍّ ولذلك يسمى تفاعله بتفاعل الإماهة، أي أن توفر الماء والسيليكات والألومينات يؤدي إلى تحويل الخلطة الإسمنتية إلى كتلة صلبة. يعتبر لوشاتولييه أول من توصل إلى أن المواد الناتجة عن إماهة الإسمنت هي ذاتها كيميائياً المكونات الناتجة عن إماهة مكونات الإسمنت كل على حدا، ويتم هذا التفاعل على فتراتٍ طويلةٍ جداً علماً أن سرعته لا تتعلق بنسب المواد الداخلة في تركيب الإسمنت وإنما بقطر جزيئات الإسمنت المطحونة حيث لوحظ أن الحبات الأصغر تتفاعل بشكل أسرع من الحبات الأكبر.

تتعلق سرعة تصلب الإسمنت بشكل رئيسي بتواجد سيليكات الكالسيوم الثلاثي والتي يرمز لها بـ C_3S ولاتتغير سرعة هذا التفاعل بشكل منتظم، ويفسر عدم انتظام التفاعل بأنه عند بدء التفاعل تتفاعل الطبقات الخارجية من حبات الإسمنت مشكلةً غلافاً صلباً رقيقاً جداً يعيق استمرار التفاعل لبعض الوقت (وهو الوقت الذي يقوم فيه العمال بصب الملاط في القوالب) ويلاحظ مرور التفاعل بالمراحل التالية: الأولى هي لحظة إضافة الإسمنت الجاف إلى الماء حيث يتفاعل السطح الخارجي لجزيئات الإسمنت ولا تتجاوز مدتها العشرة دقائق ويتوقف بعدها التفاعل (فترة خمول) والتي تستمر لمدة ساعة أو ساعتين تكون فيها الخلطة الإسمنتية بشكلٍ عجيني يسهل التحكم به، كما هو موضح بالشكل (1-18). [11]

يتحطم لاحقاً الغلاف المحيط بجزيئات الإسمنت مما يسمح للماء بالوصول إلى الإسمنت غير المتفاعل مما يؤدي للمرحلة الثانية التي يبدأ فيها التفاعل بالتناقص تدريجياً ثم يزداد مجدداً مرةً أخيراً وذلك بعد مرور 30h تقريباً، ثم يبدأ التفاعل بالتباطؤ تدريجياً لمدة تصل إلى سنة أحياناً قبل أن ينتهي.



الشكل (1-18) التغيرات التي تطرأ على تفاعل الإماهة للإسمنت مع الزمن [11]

1-4-5-3 الأنواع الرئيسية للإسمنت

إسمنت نوع 1: إسمنت بورتلاندي عادي ويستعمل في كافة المنشآت من أبنية وجسور وأرصفة ووحدات

مسبقة الصنع.

إسمنت نوع 2: يستعمل في الأعمال التي تتطلب بطناً في التجمد مع انخفاض في درجة الحرارة.

إسمنت نوع 3: إسمنت بورتلاندي عالي المقاومة الابتدائية يستعمل في المنشآت التي تتطلب سرعة في التصلب ومقاومة ابتدائية عالية وفي ظروف البرودة الشديدة أو استخدام المياه الباردة والتي تؤثر سلباً على تفاعل الإماهة.

إسمنت نوع 4: إسمنت بورتلاندي ذو حرارة إماهة منخفضة، ويستعمل بشكل خاص في المنشآت الضخمة حيث أن إبطاء تفاعل الإماهة يعني إبطاء اكتساب الخرسانة للمقاومة، وتعتبر هذه الخاصية هامة في المنشآت الكتلية حيث يسبب تفاوت درجات الحرارة من منطقة لأخرى إجهادات في الكتلة نفسها تسبب انخفاضاً في المقاومة. [38]

إسمنت نوع 5: إسمنت مقاوم للكبريتات، يستعمل في المنشآت المظمورة وفي الترب التي تحتوي على الجبس أو المركبات الكبريتية أو التي تحتوي على مياه جوفية كبريتية، حيث يعتبر تفاعل مكونات الخرسانة مع الكبريتات من أخطر العوامل الخارجية التي تتعرض لها الخرسانة وذلك لأن المواد الناتجة عن هذا التفاعل لها حجم أكبر من حجم المواد الداخلة به، مما يسبب حصول إجهادات ضمن الخرسانة ويؤدي لحصول تشققات في الكتلة.

الإسمنت الأبيض: ويستخدم لأغراض جمالية حيث يشبه الإسمنت العادي في خواصه ويختلف عنه باللون الأبيض الناتج عن انخفاض نسبة الحديد والمغنزيوم، مما يجعله مناسباً لأعمال الديكور.

ماء الجبل: إن الماء المستخدم يجب أن يكون خالياً من المياه الكبريتية الحاوية على أملاح كبريتية مثل كبريتات الكالسيوم أو كبريتات المغنزيوم لأنها تحل الكلس الموجود بالإسمنت فتضعف مقاومة العينة وتؤدي إلى انتفاخه وتشققه، وهذا يعني أن ماء الجبل يجب أن تتحقق فيه المواصفات التالية:

1. يجب ألا تتجاوز فيه نسبة المواد العالقة عن 2 gr/lit في الماء والمواد المنحلة عن 15 gr/lit .

2. يجب ألا تتجاوز نسبة كبريتات الكالسيوم عن 0.2 gr/lit ونسبة كبريتات المغنزيوم عن 0.1 gr/lit في الماء. [12]

6-4-1 الأيروجيل

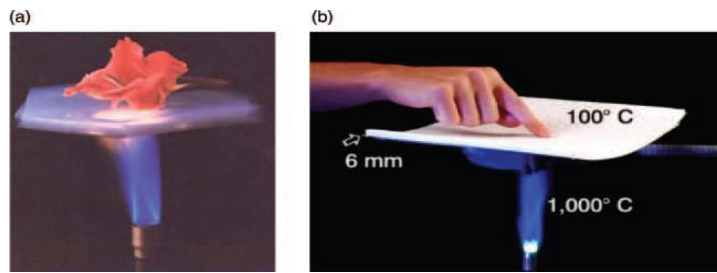
مادة خفيفة الوزن مسامية صناعية مستمدة من الجل، حيث يتم استبدال المكون السائل في الجل بالغاز ليتم الحصول على مادة صلبة مع كثافة منخفضة للغاية وإيصالية حرارية منخفضة وذات خصائص فيزيائية استثنائية استخدمت في عدة مجالات:

العزل - امتصاص الطاقة الحركية - الصناعات الدوائية - الزراعية - صناعة مواد الحشو.

أول من اكتشف الأيروجيل هو سمويل ستيفنس كيستلر عام 1931، يتم إنتاج أيروجيل عن طريق استخراج المكون السائل من هلام من خلال التجفيف فوق الحرج. أي أن السائل يجف ببطء دون التسبب في انهيار المادة الصلبة في الجل نتيجة الخاصية الشعرية كما يحدث مع التبخر التقليدي، واستمد كيستلر الأيروجيل أول مرة من السيليكا جل. [13]

الأيروجيل ذو طبيعة نصف شفافة ويتم استخراج المكون السائل من الجل عبر التجفيف، إذ يتم تجفيف السائل بشكل بطيء دون أن يسبب في المادة الصلبة الأم أي انهيار.

وهو ذو طبيعة ماصة للرطوبة وهو عازل حراري لأنه يلغي اثنين من طرائق انتقال الحرارة الثلاثة كما هو موضح بالشكل (1-19)، فهو عازل ضد التوصيل الحراري وضد الحمل الحراري وعازل ضعيف للاشعاع.



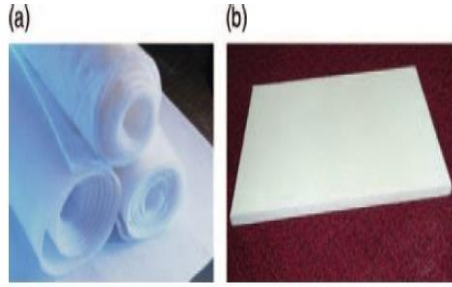
الشكل (1-19) أداء الأيروجيل العالي في العزل الحراري

الأيروجيل مادة صلبة، جامدة، وجافة وهي لا تشبه الجل في خصائصها الفيزيائية؛ اسمها يأتي من حقيقة أنها مصنوعة من الجل. إن الضغط بهدوء على الأيروجيل لا يترك عادةً أي علامة طفيفة، لكن الضغط بشكل أكبر يخلف انخفاضاً دائماً، والضغط بقوة للغاية يسبب انهياراً كارثياً في البنية المسامية، مما يسبب في تحطمه مثل الزجاج - وهذه الخاصية تعرف باسم قابلية التفتت. [13]

الاستخدام الواسع للأيروجيل ناتج عن مساميته العالية وعن أحجام المسامات فائقة الصغر (من مرتبة النانو)، وهذا يعطي الأيروجيل خصائص مميزة فيزيائية، حرارية، مرئية وصوتية، ويمكن أن يستخدم في عزل الجدران والأراضي والعليات في البناء ويأتي على شكل ألواح أو طبقات panels/blankets كما هو موضح بالشكل (1-20) وهذه الألواح عبارة عن طبقات تصنع من سيليكا أيروجيل بليف مقوى لتحويل الأيروجيل سريع الانكسار إلى مادة متماسكة-متينة.

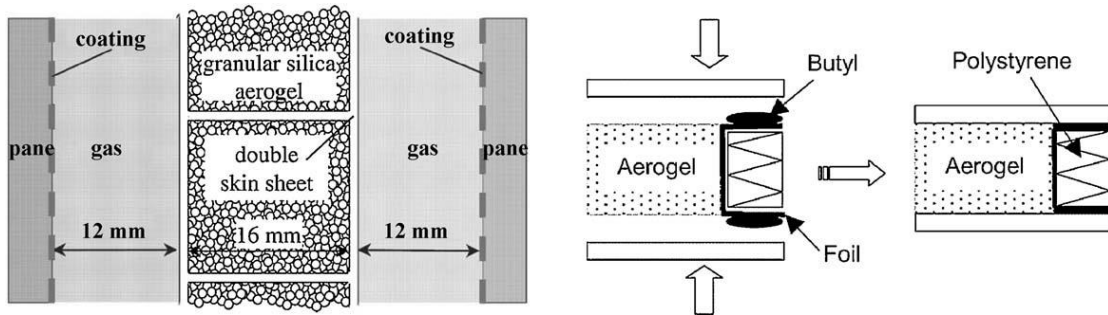
المسامية العالية للأيروجيل تجعل منه مادة صلبة خفيفة الوزن، كما هو موضح بالشكل (1-20) يمتاز بمقاومة على الانضغاط تصل إلى 3Mpa وإيصالية حرارية منخفضة $0.03W/m.K$ وقد تصل إلى

$0.004W/m.K$ [13]



الشكل (20-1) أشكال الأيروجيل

سيليكيا الأيروجيل هو النمط الأكثر شيوعاً وهو مكون من مادة السيليكيا وهو ذو كثافة منخفضة $3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ وهو عازل كهربائي جيد وعازل صوتي وغير قابل للاشتعال يستخدم في ألواح النوافذ الزجاجية كما هو موضح في الشكل (21-1) وفي أغلفة مجمعات الطاقة الشمسية وذلك كونه فائق العزل حيث أن معامل انتقال الحرارة الإجمالي ($U=0.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}$) لكنه ناقل قوي (شفاف) للاشعاع الشمسي 84-92%.



الشكل (21-1) طرائق توضع الأيروجيل كمادة عازلة

إن السعر المرتفع للأيروجيل (حيث وصل المتر المربع من الأيروجيل في العام 2008 إلى 25 يورو) يعترض طريق تطبيقه كإحدى مواد البناء الأساسية، فيمكن حل هذه المشكلة بأن يستخدم الإسمنت للعزل باحتوائه الأيروجيل (مكون بدون بنية صلبة) مما يحفظ الطاقة.

7-4-1 القرميد

إن الغضار المستخدم في صناعة الطوب (القرميد) هو عبارة عن سيليكات الألومنيوم المائية مع بعض الشوائب ويمتاز هذا الغضار باللدونة وسهولة التشغيل حتى يتم تشكيله في القوالب يدوياً أو ميكانيكياً، ويمكن أن يضاف إلى المواد الغضارية ذات اللدونة العالية والزائدة عن المطلوب، بعض المواد غير اللدنة مثل الرمل أو قشور الأرز أو ألياف الكتان لتخفيض اللدونة ولتخفيض انكماش القرميد عند التجفيف (خلال عملية التصنيع)، والشوائب التي تتواجد في الغضار هي: [14]

السيليكيا SO_2 ، الألومينا Al_2O_3 ، أكسيد الحديد Fe_2O_3 ، الجير CaO ، المغنيزيوم MgO ، القلويات Al_2O_3 و Na_2O ، وهي موجودة بنسب ضئيلة جداً وتعمل مع أكسيد الحديد والجير و المغنيزيوم كمادة صاهرة، إضافة للماء H_2O ، ثنائي أكسيد الكربون CO_2 ، ثلاثي أكسيد الكبريت SO_3 . [14]

توجد السيليكا في الغضار إما متحدة مع الألومينا أو على هيئة رمل وهي تحتاج لدرجة حرارة عالية لصهرها بخلاف مكونات الغضار الأخرى، تقود زيادة كمية السيليكا في الغضار إلى تخفيض الإنكماش وخاصة أثناء التجفيف، و يعمل الجير كمادة تساعد على الإنصهار وزيادة كميته في القرميد تسبب الإنصهار المتزايد للغضار مما يضر بالقرميد وإذا تواجد في القرميد على هيئة كربونات الكالسيوم يجب أن يكون موزعاً توزيعاً منتظماً حتى لا يتسبب في تفتت القرميد نتيجة زيادة حجم الجير الناتج عن تسخين القرميد في الأفران، وإذا تواجد على هيئة كبريتات الكالسيوم فإنه يسبب انخفاض مقاومة القرميد لدى الاستعمال.

يساعد المغنيزيوم على الإنصهار ويمنح القرميد اللون الزهري و يساعد أكسيد الحديد على تقليل درجة الإنصهار وهو الذي يعطي القرميد اللون الأحمر.

و إذا تواجدت المواد الكربونية على هيئة كربون فإنها تمنح اللون الأسود للقرميد، في حين يقود تواجد الكبريت إلى بنية اسفنجية غير ملائمة للقرميد.

استخدم الطين في تشييد الملاجئ منذ مئات السنين وأكثر من 30% من سكان العالم يعيشون في البنى ذات الأصل الترابي حيث أن التراب مادة رخيصة وصديقة للبيئة ومتوافرة بغزارة. [10]

8-4-1 الخرسانة الخلوية (AC) (Aerated Concrete)

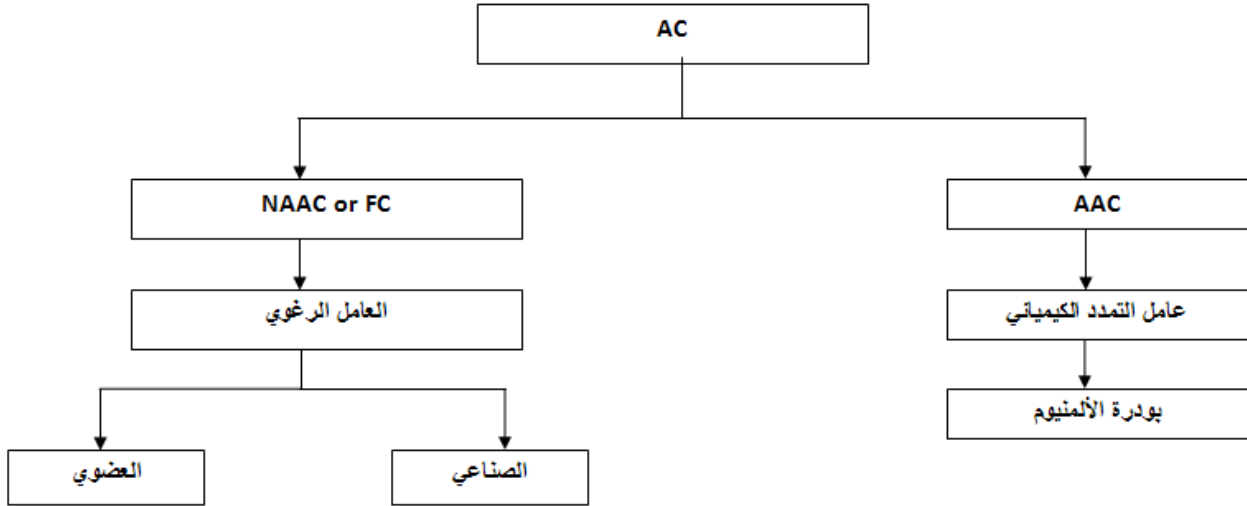
وتسمى أيضاً الخرسانة المشبعة بالهواء، المسامية، الرغوية... الخ، وهي خرسانة خفيفة منخفضة الكثافة بسبب حجم الخلايا والمسام الهوائية الموزعة فيها والتي يتم إنتاجها عن طريق إضافة مسحوق أو محلول على شكل مزيج يتفاعل بوجود الماء ضمن الملاط أثناء عملية المزج.

تقسم الخرسانة الخلوية (AC) **Aerated concrete** (كما هو موضح بالشكل (1-22)) إلى:

• **Non Aerated Autoclaved concrete (NAAC)** والذي يسمى أيضاً **Foamed**

concrete(FC) (الخرسانة الرغوية) التي لا تخضع لمعالجة الأوتوكلاف. نحصل عليها عبر حقن رغوة مشكلة مسبقاً ومستقرة أو عبر حقن مادة معروفة كعامل رغوي إلى الملاط، وجدت الخرسانة الرغوية منذ العام 1920، لكنها لم تطبق بشكل فعلي كمادة بناء حتى عام 1970، حيث يتم فصل المزيج الأساسي للغضار للملاط عن المحلول المائي المستقر (الذي هو عبارة عن عامل مولد للرغوة مع ماء) مع الحفاظ على انسجام الرغوة ضمن قاعدة المزج. يمكن أن تكون الرغوة المشكلة مسبقاً رطبة أو جافة، تنتج الرغوة الرطبة عبر بخ محلول العامل المولد للرغوة على شبكة ناعمة تمتلك فقاعات بحجم 2-5 مم وتكون هذه الرغوة نسبياً أقل استقراراً.

- **Aerated Autoclaved concrete (AAC)**: هي الخرسانة المشبعة بالهواء والمعالجة بالآوتوكلاف، ونحصل عليها عبر إضافة كمية محددة مسبقاً من مسحوق الألمنيوم إلى الإسمنت والكلس مع الغضار المصنع من رمل السيليكا. [15]



الشكل (1-22) تصنيف الخرسانة الخلوية أو المشبعة بالهواء

تمتاز AAC بانخفاض وزنها، إضافةً إلى أن مكوناتها ناعمة ودقيقة وهي: السيليكا أو رمل الكوارتز، الإسمنت ومسحوق الألمنيوم. إن رمل السيليكا يشكل أعلى نسبة مئوية من مكونات الخرسانة الأخرى وهو ذو أساس معدني ويمكن أن يحتوي على عدة صخور متكسرة من الغرانيت. هذا ويمكن استخدام الرماد المتطاير (مخلفات احتراق الوقود في المنشآت الصناعية) والخبث البركاني كمكونات إضافية إلى محتوى السيليكا العام في الخرسانة.

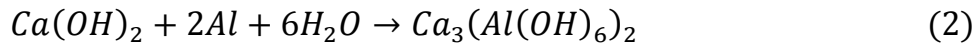
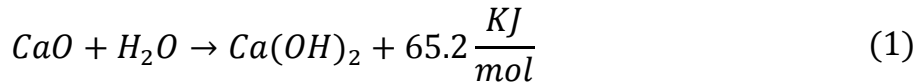


الشكل (1-23) انخفاض وزن الخرسانة الخلوية

يضاف الماء إلى هذا المزيج لترطيب المواد الأولية مع الإسمنت بهدف تكوين روابط بين المكونات الناعمة والملاط الإسمنتي. أخيراً يوضع المزيج في الأوتوكلاف الذي هو وعاء مضغوط بالبخار يقدم طاقة حرارية كبيرة. هذه المعالجة للخرسانة تتم في درجة حرارة 120°C وضغط عالي (4 – 16) Mpa ولمدة زمنية h (8 – 16).

الأوتوكلاف ضروري لتخفيض التقلص الذي يحدث بالخرسانة نتيجة التجفيف لاسيما إذا كانت الخرسانة ستعرض لاحقاً للانفعال والانضغاط. [16]

قبل المزج النهائي، يضاف عامل التمدد (التوسع) إلى المزيج ليزيد من حجمه كما هو موضح في الجدول (2-1) وهذا يعني زيادة في الحجم من 2 إلى 5 مرات نسبة إلى الحجم الأصلي للملاط (العجينة الإسمنتية)، وتلخص التفاعلات التالية مراحل تشكيل الخرسانة الرغوية:



تمثل $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ هيدرات سيليكات الكالسيوم - الطور النهائي (طور التوبرموريت) ويرمز له بـ $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$.

جدول (2-1) متطلبات تصنيع AAC [16]

من أجل تصنيع 1m^3 من AAC بكثافة جافة مقدارها 500 kg/m^3		المواد الخام
مع الرماد المتطاير	مع رمل	
	340-320	الرمل [kg]
100-90	75-65	الإسمنت [kg]
60-50	75-65	الكلس [kg]
	15	الجبس [kg]
0.6-0.5	0.6-0.5	الألمنيوم [kg]
250	230	الماء [kg]
340-320		رماد متطاير كمخلفات [kg]
140		ماء لتوليد البخار في الأوتوكلاف [kg]
11-12		وقود [kg]
0.15		زيت للقالب [L]
1		كرات الطحن [kg]

9-4-1 العوامل المولدة للرغوة وعوامل توسع الإسمنت

1-9-4-1 العامل الرغوي

يتحدد العامل الرغوي وفق كمية الإشباع المطلوبة بالهواء، وعندما تضاف العوامل الرغوية إلى الملاط تنتج فقاعات منفصلة. تتعلق خصائص FC بجودة الرغوة المتشكلة، يصنف العامل الرغوي إلى:

- صناعي: مناسب للحصول على كثافات بقيمة 1000 kg/m^3 وأعلى.

- بروتيني: مناسب للحصول على كثافات بقيمة تتراوح من $400-1600 \text{ kg/m}^3$.

العامل الرغوي التركيبي (الصناعي): مصنع من مواد كيميائية نقية، ينتج خرسانة مستقرة جداً مع مقاومة ميكانيكية جيدة.

العامل الرغوي ذو الأساس البروتيني: يمتلك كثافة بقيمة 80 g/lit ويستخلص العامل الرغوي ذو الأساس البروتيني من البروتينات الحيوانية (قرون، عظام .. وغيرها من بقايا جثث الحيوانات) مما يضفي رائحة خاصة على FC، وتختلف جودة الخرسانة الناتجة FC باختلاف مصادر العوامل الرغوية ذات الأساس البروتيني. تمتلك العوامل الرغوية الصناعية فقاعات هوائية (مسام) بأحجام ناعمة مقارنة مع البروتينية. [2]

2-9-4-1 مسحوق الألمنيوم

هو عامل توسع للإسمنت، تتم إضافته إلى الملاط الطازج ليحدث التفاعل الكيميائي المطلوب ويتولد الغاز الذي يشكل الفقاعات الهوائية في AAC. يتفاعل عامل التوسع (مسحوق الألمنيوم) مع هيدروكسيد الكالسيوم الذي هو ناتج التفاعل بين الإسمنت والماء، وهيدروكسيد الكالسيوم يفيد في إزالة بعض الماء من المزيج وجعله سميكاً بعض الشيء، بعدها ترتفع PH المحلول لتصل إلى 12 وهذا التفاعل بين مسحوق الألمنيوم وهيدروكسيد الكالسيوم يطلق غاز الهيدروجين مما يسبب تشكل الفقاعات الغازية ثم يصعد الهيدروجين (غاز خفيف) خارج المزيج ويحل محله الهواء (الغاز الأثقل) مما يزيد من حجم العينة.

يضاف الألمنيوم بكمية تتراوح من 0.2-0.5 % من الوزن الجاف للإسمنت. يتوفر مسحوق الألمنيوم

بثلاثة أنماط: جزيئات مفتتة، رقائقية، حبيبة. [2]

تتشابه الجزيئات المفتتة في طولها وعرضها وسماكتها أما الجزيئات الرقائقية فيكون الطول أو العرض فيها أكبر بألاف المرات من سماكتها في حين أن الجزيئات الحبيبة تمتلك أحجام أقل من $100 \mu\text{m}$ وبالتالي فهي تشكل غيوماً من الغبار خلال عملية صب الخرسانة.

إن مسحوق الألمنيوم المستخدم في معامل إنتاج AAC هو من المخلفات، ويكون على شكل رقائق صفيحية ميكروسكوبية والأحجام المطلوبة تتراوح من $(50-100) \mu\text{m}$ للحصول على خصائص ميكانيكية مميزة للAAC. [2]

5-1 الهندسة الكسيرية (Fractal Geometry)

أُتبع في هذه الأطروحة نموذج الهندسة الكسيرية لدراسة معامل التوصيل الحراري في الأوساط المسامية للعينات المحضرة في القسم العملي، لأن بنية الخرسانة الخلوية (العينة الاسمنتية العازلة) تتألف من طورين في الحالة الجافة: مسام (هواء) ومادة صلبة (اسمنت)، ومن ثلاثة أطوار في الحالة الرطبة: مسام (هواء) ومادة صلبة (اسمنت) وماء (رطوبة). لقد قام العديد من الباحثين بنمذجة معامل التوصيل الحراري في الأوساط المسامية اعتماداً على نموذج العناصر المركبة، نموذج حجوم العناصر المنتهية، نموذج الفروق المنتهية ونموذج الهندسة الكسيرية (حصيرة سيرينسكي والوسط المسامي الحقيقي). [17, ..., 22]

لذلك لا بد من التطرق إلى الاختلاف بين الهندسة الإقليدية والكسيرية.

في الهندسة الإقليدية: يرتبط عنصر القياس ببعد، حيث يمكن قياس النقاط والخطوط والسطوح والأحجام في الهندسة الإقليدية باستخدام الأبعاد الصحيحة 0,1,2,3.

في الهندسة الكسيرية: يمكن تمثيل العناصر غير المنتظمة والفوضوية في الطبيعة مثل الأنهار والجبال والجزر اعتماداً على الهندسة الكسيرية، هذه العناصر تسمى كسيرية أو كسورية، وأبعاد مثل هذه الأجسام غير صحيحة ويرتبط عنصر القياس الكسيري $M(L)$ بالبعد L وفق العلاقة الآتية: [23]

$$M(L) \sim L^{D_f} \quad (4)$$

يمكن أن تصف $M(L)$ طول خط أو مساحة سطح أو حجم مكعب أو كتلة عنصر، ويمثل D_f البعد الكسيري.

يوجد نوعان من التماثل (التشابه) الذاتي² في النظرية الكسيرية:

1. تشابه ذاتي تام ودقيق مثل منحنى كوش Koch، وحصيرة سيرينسكي Sierpinski carpet.
2. تشابه ذاتي بشكل إحصائي مثل الوسط المسامي الحقيقي، وهذا يفسر بعدد المسام N وفق العلاقة:

$$N(L \geq \lambda) \sim \left(\frac{\lambda_{max}}{\lambda} \right)^{D_f} \quad (5)$$

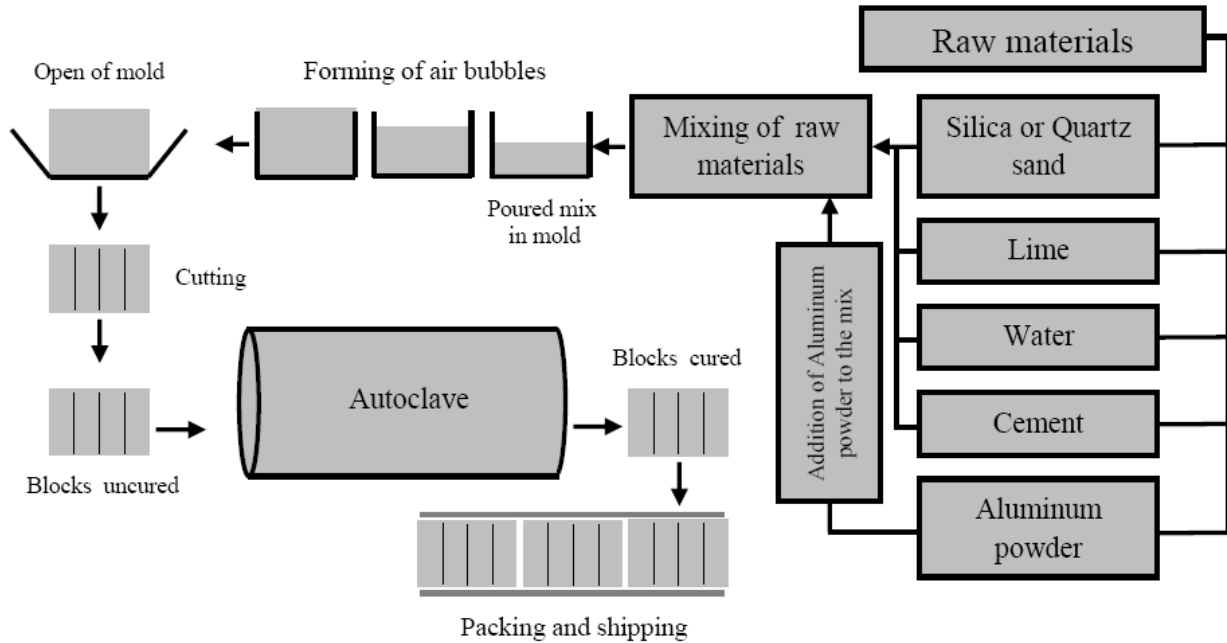
² التماثل الذاتي: self-similarity

يمثل λ حجم المسام من λ_{min} وحتى λ_{max} .

6-1 الدراسة المرجعية

قام **A.Hamad (2014) [2]** بدراسة المواد المكونة للخرسانة الخلوية (المشبعة بالهواء) وقام بتصنيفها

إلى: خرسانة مشبعة بالهواء معالجة باللاوتوكلاف (AAC)، وخرسانة رغوية غير معالجة باللاوتوكلاف (FC). تختلف الخرسانة الرغوية عن الخرسانة المشبعة بالهواء والمعالجة باللاوتوكلاف بعامل توليد المسام (الجيوب الهوائية)، لأن الجيوب الهوائية في الخرسانة الرغوية تتشكل عبر عامل الرغوة وفق تفاعل فيزيائي أي أن العملية فيزيائية، في حين أن الجيوب الهوائية في الخرسانة المشبعة بالهواء والمعالجة باللاوتوكلاف تتشكل عبر تفاعل مسحوق الألمنيوم مع مواد أخرى كما هو موضح بالشكل (1-24) ويتم ذلك وفق تفاعل كيميائي أي أن العملية كيميائية.



الشكل (1-24) طريقة تصنيع AAC [2]

قدم الباحث ب.كعدان (2013) [8] صورة مفصلة عن الخامات الغضارية المتواجدة في القطر العربي

السوري وتوزعها وأهم المعالجات التي تجرى عليها، بالإضافة إلى مكوناتها وأهم مقالها.

يعتمد تطور البلدان في العالم على ما يمتلكه هذا البلد من خامات طبيعية لما تقدمه من منافع كبيرة وإستراتيجية وخصوصاً في مجال الصناعة، حيث تشكل الخامات الطبيعية الحجر الأساس لقطاع صناعي منتج ومتطور، والجمهورية العربية السورية من إحدى أغنى بلدان العالم بالخامات الطبيعية بكميتها ونوعيتها (مثل

النفط الخام، الغاز، الفوسفات، الغضار، الحجر الكلسي...) والخامات الغضارية هي إحدى أهم هذه الخامات الطبيعية المتواجدة في الجمهورية العربية السورية.

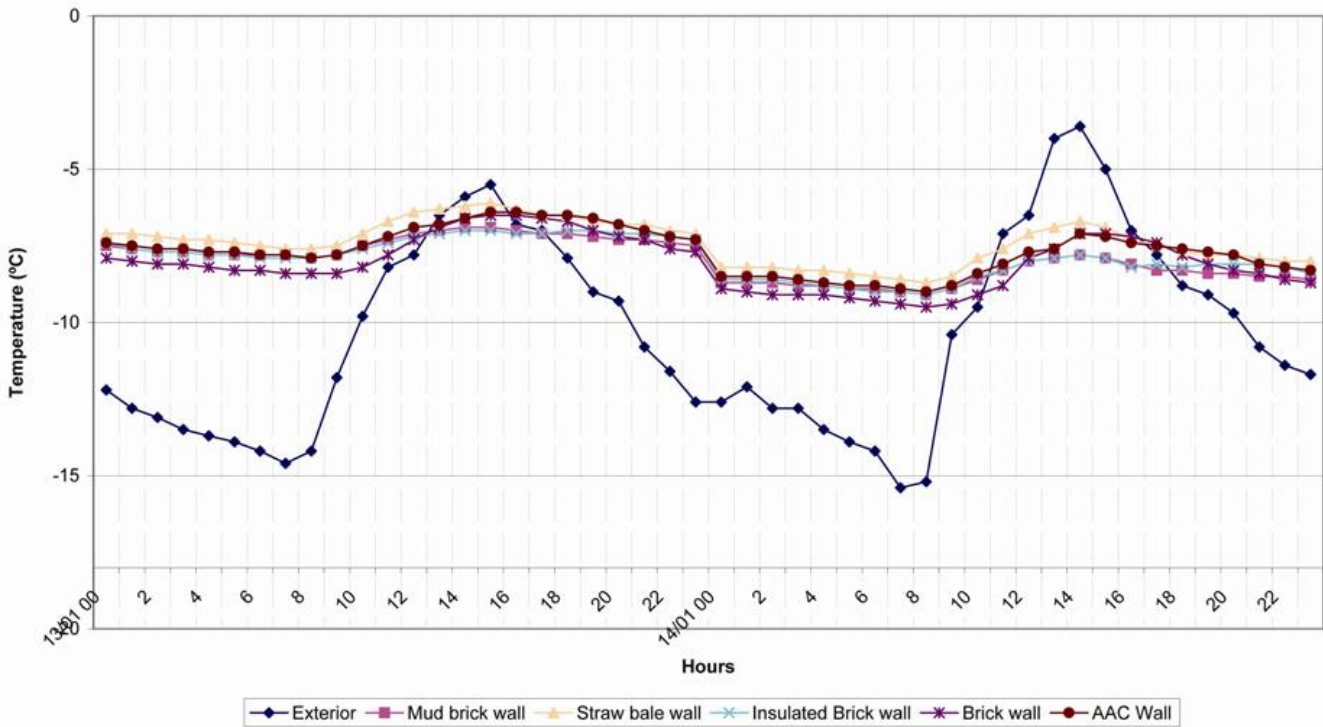
بين الباحثان **وتي والنجار (1996) [9]** دور الملح (كلوريد الصوديوم) في إضافة المسامية للعينة الإسمنتية. تستخدم خلايا ذات حاجز مسامي في عمليات التحليل التي تجري على ملح كلوريد الصوديوم (المهبط والمصعد) ، ويحضر هذا الحاجز من مزج الإسمنت مع ملح كلوريد الصوديوم، يغسل بعدها المزيج لينحل الملح ويخلف وراءه مسامات تكفي لانتقال الشوارد المنحلة باتجاهين متعاكسين وفق المهبط والمصعد.

تمت دراسة الخصائص الكيميائية والفيزيائية للطين الأحمر **Liu et al. (2012) [10]** حيث تبين أن: الطين الأحمر يمثل أحد فضلات الإنتاج خلال عمليات المعالجة الفيزيائية والكيميائية للبوكسيت، ويتغير تركيب الطين الأحمر مع تغير مصدر البوكسيت، ومع تغير كمية الألومينا التي يمكن أن تستخلص منه. إن المكونات الأساسية للطين الأحمر هي: $MgO, K_2O, TiO, NaO, CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3$. الطين الأحمر مادة دقيقة للغاية، بحجم وسطي للجزيئة أقل من $10 \mu m$ ويمتلك الطين محتوى مائي كبير أي تقريباً 93% من إجمالي الوزن ومقاومة انضغاط عالية (28-40) Mpa. نوه الباحثون إلى أن الطين الأحمر يدخل في صناعة الزجاج والإسمنت والقرميد الأحمر بالإضافة إلى صناعة الخرسانة الخلوية AC بالطين الأحمر والتي تم تطويرها باستخدام الإسمنت (15%) والكلس (12-15%) والطين الأحمر (35-40%) ورمل السيليكا (33-35%). يمكن لهذه العملية أن تقلل من تكاليف إنتاج الخرسانة الخلوية من خلال الاستفادة من الطين الأحمر.

في حين أشار الباحثون **Aidan et al. (2009) [16]** إلى ضرورة اتخاذ بعض الخطوات التي تزيد من المقاومة الميكانيكية لل AAC مثل:

- إن اعتماد الشكل المتبلور من السيليكا، مثل الكوارتز، يساعد على زيادة تبلور سيليكات الكالسيوم المائية المتشكلة في الأوتوكلاف.
- إن المساحة السطحية الخاصة والمميزة للسيليكا مهمة جداً، لذا يتم طحن السيليكا (الرمل) في معظم الحالات للوصول إلى النعومة المطلوبة عن طريق مطحنة الكرات، إذ تخفض الرمال الناعمة من زمن المعالجة ومن درجة التبلور، وتزيد من المقاومة الميكانيكية.
- إن الكلس الحي ضروري لتوفير الحرارة في المزيج وفي حال غياب الكلس تكون عملية توليد الغاز وعملية التصلب بطيئتين.

قامت **Soofia et al. (2006) [23]** بدراسة السلوك الحراري لكل من القرميد الأحمر، القرميد الأحمر المفرغ، حزم القش، المباني مسبقة الصنع في شهر كانون الثاني، باستخدام برنامج محاكاة ECOTECT 5.2، قام الباحثون بنمذجة ذلك على الكمبيوتر بمعرفة قيم المقاومات الحرارية لطبقات البناء لحساب المقاومة الحرارية الإجمالية للمباني مسبقة الصنع والتي تصنع من ألواح خرسانية مع بعض ألواح العزل. إن المباني مسبقة الصنع لا تخزن الحرارة لوقت طويل من الزمن. يتماثل القرميد الأحمر المجوف في سلوكه الحراري مع القرميد الأحمر لكنه لا يصل بأدائه إلى الأداء الجيد لحزم القش كما هو موضح في الشكل (1-25)، في حين ترتفع مستويات الرطوبة ضمن القرميد الأحمر والمباني مسبقة الصنع وتقلب مع تقلبات مستويات الرطوبة الخارجية وقد تبين أن حزم القش تسلك السلوك الحراري نفسه ل AAC وأن جدار القرميد الأحمر له خصائص القرميد الأحمر المعزول نفسها مع أن تكاليف إنتاج القرميد الأحمر المعزول وغير المعزول أعلى من تكاليف إنتاج القرميد المحلي.



الشكل (1-25) تغيرات درجة الحرارة خلال الليل والنهار في يومين من أيام كانون الثاني من أجل مباني بجدران مختلفة التركيب: جدران مصنوعة من AAC والقرميد الأحمر والقرميد الأحمر ومقارنتها مع الوسط الخارجي

تمت دراسة العزل الحراري والمقاومة الميكانيكية للقرميد الأحمر الليفي المقوى (FRMB) من قبل **Binici et al. (2006) [24]**، حيث تمت دراسة إحدى عشرة خطة للقرميد الأحمر الليفي كما هو موضح بالجدول (1-3).

الجدول (3-1) تركيب العينات الإحدى عشر للقرميد الأحمر الليفي [24]

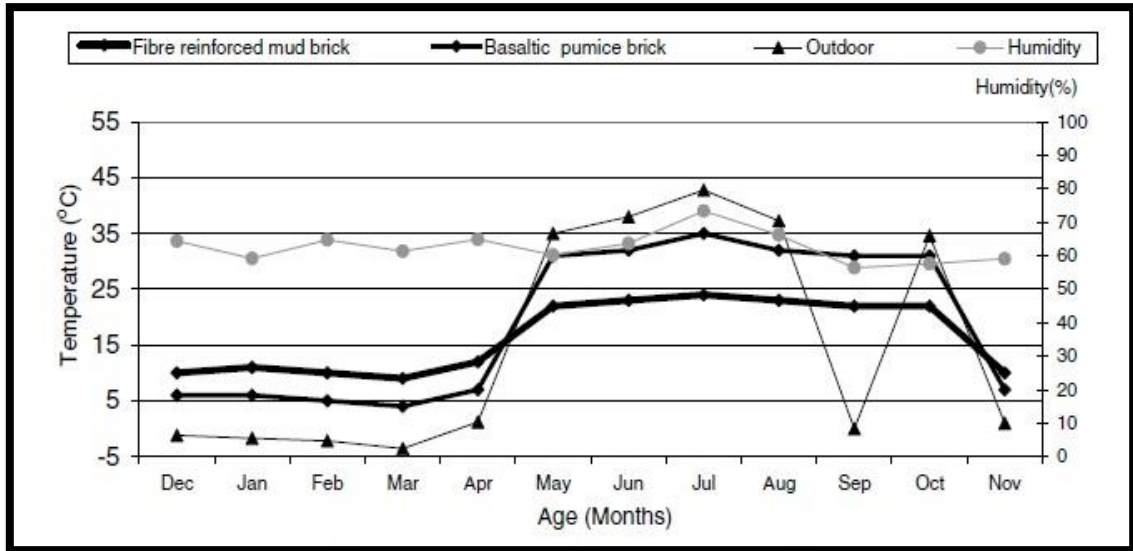
A1	Clay + plastic fibre + basaltic pumice + water
A2	Clay + plastic fibre + cement + water
A3	Clay + plastic fibre + gypsum + water
B1	Clay + straw + basaltic pumice + water
B2	Clay + straw + cement + water
B3	Clay + straw + gypsum + water
C1	Clay + polystyrene fabric + basaltic pumice + water
C2	Clay + polystyrene fabric + cement + water
C3	Clay + polystyrene fabric + gypsum + water
D (traditional mud brick)	Clay + straw + water
E (basaltic pumice brick)	Pumice + cement + water

لتكون نتائج المقاومة الميكانيكية والكثافة على النحو التالي كما هو موضح بالجدول (4-1):

الجدول (4-1) المقاومة الميكانيكية وامتصاص الماء والكثافة للعينات

	المقاومة الميكانيكية N/mm ²		إمتصاص الماء (%)	الكثافة الظاهرية (g/cm ³)
	يوم 30	يوم 60		
	A1	4.5	6.1	
A2	5.2	6.7		1.266
A3	3.8	5.3		1.279
Average	4.5	6.0	31.1	1.263
B1	3.9	4.8		1.248
B2	4.8	5.8		1.257
B3	3.5	3.7		1.255
Average	4.0	4.7	34.8	1.253
C1	3.8	3.9		1.251
C2	4.1	4.7		1.271
C3	3.7	3.6		1.258
Average	3.0	4.1	32.5	1.260
D	1.2	1.8	38.7	1.253
E	2.0	2.8	28.6	1.290

يبين الجدول (4-1) أن الكثافة الظاهرية للعينات تكون بحدود 1290 Kg/m^3 مع مقاومات ميكانيكية تتراوح قيمتها $(1.2 - 6.7) \text{ Mpa}$ وامتصاص للماء لا يتجاوز 38.7%. كما قام الباحثون بدراسة الأداء الحراري لعينتي القرميد الأحمر الليفي المدعم والخفاف البازلتية على مدار العام كما هو موضح بالشكل (1-26).



الشكل (1-26) الأداء الحراري للعينات

إذ أشار الباحثون إلى أن القرميد الأحمر المدعم بالليف يبدي عزلاً للحرارة في فصلي الصيف والشتاء على حد سواء أفضل من الخفاف البازلتية بشكل ملحوظ، حيث أن: البيت المبنى من القرميد الاحمر الليفي المقوى يؤمن مناخاً أكثر برودةً بمقدار 56,3% عن البيت المصنوع من القرميد الاحمر في فصل الصيف وأكثر دفئاً بـ 41,5% في فصل الشتاء أيضاً عن البيت المصنوع من القرميد الاحمر.

ينصح باستخدام الخبث البركاني البازلتية مع القرميد الاحمر لتجنب احتمالية حدوث رشح (تكاثف لبخار الماء) على الجدران.

لقد تم التوصل الى أن المقاومة الميكانيكية للقرميد الاحمر الليفي تتراوح ضمن المجال $(6.7) N/mm^2$ وهي أعلى بكثير من تلك التي يمتاز بها القرميد الاحمر التقليدي $(1-0.5) N/mm^2$ بينما المقاومة الميكانيكية للقرميد الاحمر مع الإسمنت هي الأعلى وتلك التي مع الجبس هي الأدنى في حين أن قوى الضغط للعينات مع ألياف البلاستيك أعلى مقاومةً من العينة التي استخدم القش في تركيبها.

قام الباحثون **Hostler et al. (2009) [25]** بإجراء مقارنة بين أداء الأيروجيل المصنع من الغضار لوحده، وبين الأيروجيل المصنع من الغضار مع كحول البوليفينيل، حيث تقود إضافة البوليمير إلى انخفاض في الإيصالية الحرارية للأيروجيل، وتكون مقاومته الميكانيكية منخفضة نتيجة لمساميته العالية، ولا يشكل انخفاض المقاومة الميكانيكية عائقاً عندما يستخدم الأيروجيل كمادة حشوية حول مادة أخرى ذات بنية قاسية، إذ لا يستخدم الأيروجيل كمادة بناء أساسية فهو يحتاج إلى صلابة إضافية. بما أن معظم أساس الأيروجيل هو من السيليكا فيمكن إيجاد بنية جديدة للأيروجيل بوجود إضافات أخرى كالغضار. يحقق الأيروجيل بأساس غضاري (Aeroclay) بنية مستقرة بدون استخدام المذيبات، فهو محضر من معلق غضار

المونتموريلونيت والماء فقط مما يجعل سميته أقل من الأيروجيل. تحضر عينات الأيروجيل بعملية التجفيد للحصول على شرائح غضارية رقيقة متوازية فيما بينها مع عدد محدود من الدعامات بين تلك الشرائح كما هو موضح بالشكل (1-27).

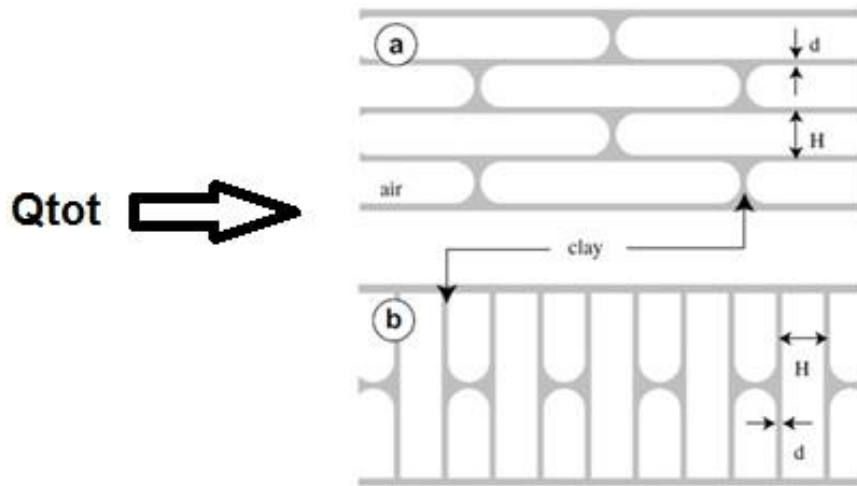
مزج الباحثون غضار المونتموريلونيت المبادل بالصوديوم مع الماء المقطر في خلاط مخبري ثم تم وضع المزيج في قالب تصنع جوانبه من مادة البولي تيترافلوروايثيلين وقاعدته من الألمنيوم وتكون هذه القاعدة على تماس بالنتروجين السائل ليتم تجميد العينة بالكامل.

يدخل القالب المجمد بمافيه العينة إلى المجفدة (مع تطبيق ضغط التخلية) لمدة تتراوح من (36-48)h، يضاف البوليمير لاحقاً لزيادة الصلابة الميكانيكية للعينة.

تجمد عينات الأيروجيل وتُصعد (التصعيد هو تحول المادة من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية مباشرة) للحصول على عينتين مختلفتين:

العينة الأولى (a): أفقية وتكون فيها شرائح الغضار موازية لسطوح للعينة، يتم قياس الإيصالية الحرارية بالاعتماد على سماكة العينات ويكون التدفق الحراري عمودي على شرائح الغضار، ويتبع مساراً معقداً من خلال الدعامات (الدعامات) الواصلة بين الطبقات و/أو خلال الجيوب الهوائية ضمن المادة كما هو موضح بالشكل (1-28).

العينة الثانية (b): شاقولية حيث تمتد شرائح الغضار على سماكة العينة وبالإضافة إلى التدفق الحراري الذي يتم عبر الجيوب الهوائية والدعامات (الدعامات) فإن التدفق الحراري يكون موازياً للطبقات ضمن الأيروجيل.



الشكل (1-27) عينة الأيروجيل - غضار (aeroclay): التوضع الشاقولي والأفقي للدعامات

العينة الثالثة: يضاف فيها البوليمير لزيادة صلابة العينة والتي يتم التحكم بها عن طريق تغيير تركيز PVOH إلى مزيج الغضار - ماء قبل التجميد.

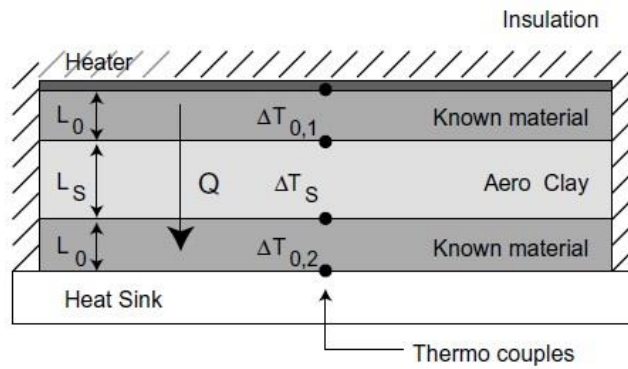
تحدد الإيصالية الحرارية بوضع عينة *aeroclay* بين عينتين تمتلكان معامل توصيل حراري محدد مسبقاً وباستخدام المزدوجات الحرارية كما هو موضح بالشكل (1-28) يتم تحديد ΔT وبحسب معامل التوصيل الحراري من العلاقة:

$$k_{eff} = \frac{Q_{tot} \cdot L_{tot}}{A_{tot} \cdot \Delta T} \quad (6)$$

A_{tot} مساحة الخلية المعامدة للتدفق الحراري Q_{tot}

L_{tot} سماكة العينة

ΔT فرق درجات الحرارة



الشكل (1-28) استخدام المزدوجات الحرارية لتحديد الإيصالية الحرارية للعينة

ولقد لوحظ أن الإيصالية الحرارية للغضار تزداد بازدياد كمية الماء الممتص في الغضار، لذا فإن معرفة محتوى الماء أمر ضروري لتحديد الإيصالية الحرارية لعينة الأيروجيل.

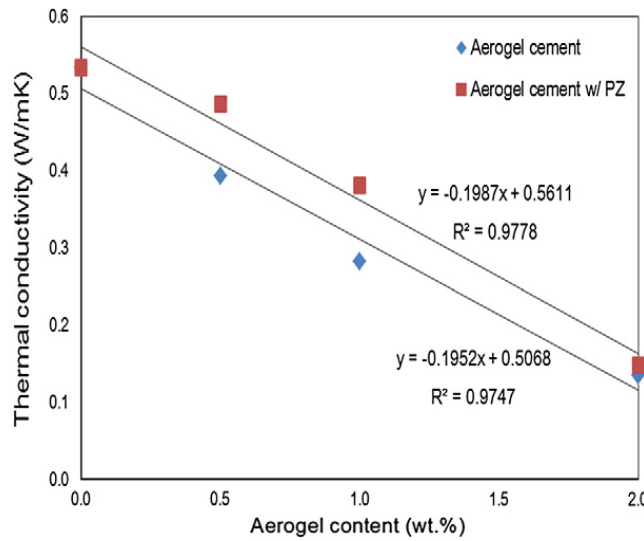
درس الباحثون **Kim et al. (2013) [26]** مزايا دمج الأيروجيل مع الإسمنت، مع تغيير نسبة كمية الأيروجيل المضافة، حيث يُستخدم الإسمنت البورتلاندي مع سيليكات الأيروجيل-المسحوق.

إن الأيروجيل مادة شرهة للماء بشكل قوي، وبالتالي من غير الممكن أن يتم مزجها بشكل مباشر مع ملاط الإسمنت أو مع الإسمنت بوجود الماء المقطر، لذلك يحضر الجل من مسحوق الأيروجيل بحضور الميثانول لتسهيل عملية المزج المستقر مع الإسمنت.

تتناقص القوة الميكانيكية لعينة أيروجيل-اسمنت بصورة مؤثرة بسبب الخواص الفيزيائية للأيروجيل فهو ذو كثافة منخفضة ومسامية عالية (يقود حجم المسام الكبير إلى تصدع في عينة AC)، والنسبة الكتلية بين الأيروجيل والميثانول هي 0.7:1.

يستبدل 20% من الإسمنت بالبوزولان³ لتجنب التمدد السيء لعينات الإسمنت الصلبة. يتم تحضير الملاط في المخبر ضمن شروط الجو المحيط. تتم تغطية قالب بفيلم من البولي إيثيلين بعد الصب في القالب للمحافظة عليه من التبخر، ثم يخزن لمدة 24 h في شروط جوية برطوبة (RH(90%) وبدرجة حرارة $(20 \pm 1)C^\circ$ ، ثم تخزن في حاويات للماء لمدة 28 يوم.

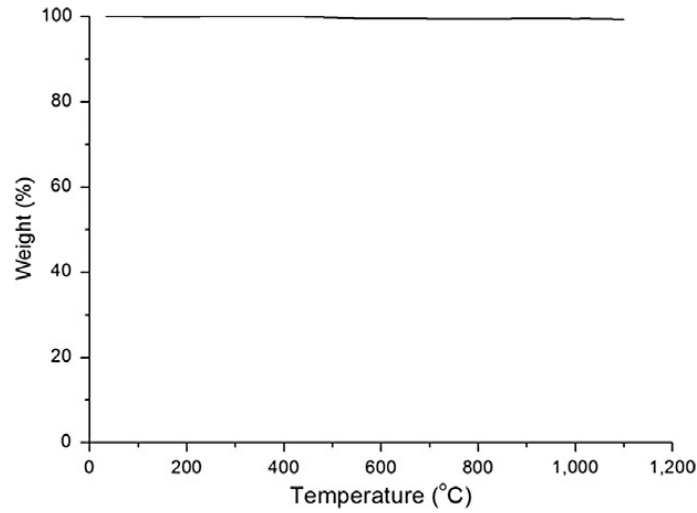
تمت دراسة تغيرات الوزن النوعي للعينة مع تغيرات درجة الحرارة لتصل حتى $1150^\circ C$ ولم يحدث أي تغير في الكتلة، وهذا يعني أن الأيروجيل هو مادة ثابتة جداً في أي درجة حرارة كما هو موضح بالشكل (1-29) وبالتالي فإنه يمكن تطبيق الأيروجيل مع الإسمنت في المباني لمقاومة اللهب كمادة عزل دون انبعاث الغازات السامة التي تتشكل في حالة اللهب.



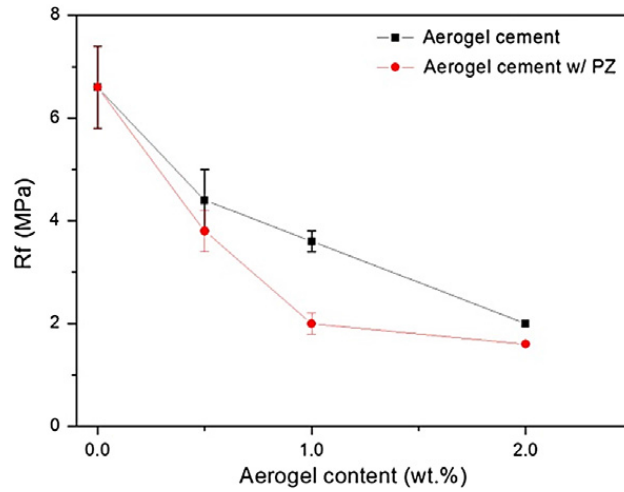
الشكل (1-29) تغير الإيصالية الحرارية للعينة مع تغير محتوى الأيروجيل فيها من أجل عينتين: العينة الأولى Aerogel cement والعينة الثانية Aerogel cement w/PZ (إسمنت مع بوزولان)

استخلص الباحثون إلى أن الأيروجيل يتوضع بشكل مستقر ضمن بنية الإسمنت بدون حدوث أي تغيير فيزيائي أو كيميائي، وأن الإيصالية الحرارية للعينات تنخفض إلى 25% من الإيصالية الحرارية للإسمنت التقليدي كما هو موضح بالشكل (1-30)، وتنخفض الإيصالية الحرارية للعينة بشكل خطي مع ازدياد محتوى الأيروجيل بالمقارنة مع الإسمنت العادي. تتناقص المقاومة الميكانيكية للعينة بزيادة محتوى الأيروجيل، لأن الأيروجيل لا يمتلك مقاومة ميكانيكية عالية كما هو موضح بالشكل (1-31).

³ البوزولان: تركيبه الكيميائي $Al_2O_3 \cdot SiO_2$



الشكل (30-1) ثبات عينة الأيروجيل (وزناً) مع تغير درجات الحرارة بحدود عظمى تصل إلى 1200 °C



الشكل (31-1) تغير المقاومة الميكانيكية للعينة مع تغير محتوى الأيروجيل فيها من أجل عينتين Aerogel cement والثانية Aerogel cement w/PZ أي إسمنت مع بوزولان

قام الباحثان **Salim و Dhirar (2011) [27]** بتنفيذ خرسانة خلوية باستخدام المواد التالية:

- الإسمنت البورتلاندي
- الرمل
- غبار السيليكا (fume) وهو مسحوق دقيق بشكل لا متناه يضاف لتحسين أداء الخرسانة بنسبة تتراوح ضمن المجال (6 – 10%) من المحتوى الإجمالي للمزيج ويمكن زيادة النسبة حتى 15%.
- مادة عالية اللدونة تعرف تجارياً باسم 10 melment.

- الخرز الشفاف المائي: وهو نوع من البوليمرات فائقة الامتصاص للماء يمكنها أن تمتص الماء وتتضخم وتتحول خلال وقت قصير إلى شكل الجل لتقوم بتوليد فقاعات ضمن الملاط كما هو موضح بالشكل (32-1) في حين يحسّن كل من دخان السيليكا والمادة الملدنة من مقاومة الانضغاط.



الشكل (32-1) الخرز البلوري المائي مع العينة الخرسانية الناتجة

ينتفخ الخرز المائي البلوري في الماء بعد أن يلقى في الماء لمدة 24h ويزداد حجمه ويمزج مع الإسمنت الجاف، ثم تمزج المادة الملدنة مع الماء وتضاف إلى المزيج. يمزج المزيج النهائي يدوياً، وتحسب كمية الماء المضافة إلى المزيج كنسبة مئوية من المواد الرابطة (دخان السيليكا + الإسمنت). يصب المزيج في قوالب ويغطي سطح القالب بصفحة ذات وزن خفيف لمنع حبات الخرز من أن تطفو على السطح، تزال العينات من القوالب بعد يوم واحد وتقسّم إلى مجموعتين: المجموعة الأولى تلقى بالماء بدرجة حرارة 23°C والمجموعة الثانية تعالج بدون ماء وتغطي بشرائح من البوليتين وتترك لفترة من الزمن، وتبين للباحثين أن الكثافة الجافة للخرسانة الخلوية الناتجة عن بلورات الخرز المائية تتراوح في المجال $(1200-1600) \text{ Kg/m}^3$.

تتراوح مقاومة الانضغاط للعينات المعالجة بالماء بعد 28 يوماً في المجال $(8.8-19.7) \text{ Mpa}$ بينما تتراوح مقاومة الانضغاط للعينات المعالجة بدون ماء وبعد 28 يوماً في المجال $(8.28-15.67) \text{ Mpa}$ وأن امتصاص العينات للماء أقل بـ 14% من الخرسانة الخلوية المصنعة.

استخلص الباحثان إلى أن التكلفة الاقتصادية لتحقيق الخرسانة الخلوية بهذه الطريقة هي نفسها لتحقيق الخرسانة التقليدية لكنها أقل من تكلفة إنتاج الخرسانة الخلوية العراقية.

قام الباحثان **Grutzeck, M, DiCola M. [28]** بتقديم مكون إضافي لـ AAC مع الإسمنت والكلس والرمل وهو الرماد المتطاير الناتج عن احتراق الوقود في المحطات الحرارية (مخلفات). يمتلك AAC وزناً خفيفاً، ونتيجة لبنيته الخلوية فإنه يصبح هشاً عند إجراء عملية التقطيع، لذا كان هدف البحث أن يستبدل الرماد المتطاير التقليدي برماد متطاير معالج بتفاعله مع المحلول القلوي NaOH، ويطلق على مزيج الرماد المتطاير مع محلول NaOH اسم الزيوليت، وتأتي قساوة AAC نتيجة لإضافة NaOH إلى المزيج.

تتشكل الكعكة الخرسانية بعد أن يتضخم مزيج الإسمنت مع الرمل والرماد المتطاير والكلس نتيجة إضافة مسحوق الألمنيوم إليه، حيث تسحق الإضافات الناتجة عن تضخم الكعكة وتجفف لتصبح مصدراً للمواد العائدة (returns). إن احتواء المزيج على مواد عائدة أيضاً ينتج عينات AAC بمواصفات أفضل.

تتم إضافة الرماد المتطاير الزيوليتي⁴ كبديل عن الرماد المتطاير التقليدي (غير المعالج) كما هو موضح بالجدول (5-1) ويضاف مسحوق الألمنيوم في الدقيقة الأخيرة من المزج والمزيج يكون مائعاً جداً ويتخمر في القالب، ويحدث مايلي:

- يتفاعل الإسمنت البورتلاندي والكلس بوجود الماء.
- يذوب الإسمنت ثم يُحلمه الكلس وينتج $Ca(OH)_2$ ، التي تفيد في إزالة بعض الماء من المزيج وجعله كثيفاً بعض الشيء.
- ترتفع درجة القلوية (PH) للمحلول لتصل إلى 12، ويبدأ مسحوق الألمنيوم بالتفاعل مع المحلول القلوي بشكل آني، هنا يتضاعف حجم العينة وينتج الهيدروجين على شكل فقاعات غازية. تقود إضافة NaOH إلى احتمالين:
- إمكانية مزج الرماد المتطاير مع NaOH لإنتاج الزيوليت (مع التحريك المستمر عند درجة حرارة $90^{\circ}C$) ليتحول الناتج بشكل جزئي إلى غضار وهذا يعني أن التفاعل ممكن ثم يجفف هذا الغضار بدرجة حرارة $38^{\circ}C$ ليستخدم كجزء من المزيج الكامل للرماد المتطاير وللمواد العائدة المستخدمين في تصنيع AAC.
- إمكانية مزج الإسمنت البورتلاندي مع NaOH ومعالجته حتى $185^{\circ}C$ لتحقيق طور يحتوي على الزيوليت والتورموريت.

جدول (5-1) المواد الخام لتصنيع AAC [17]

الإضافات	AAC مع مسحوق الكوارتز (%)	AAC مع مسحوق الكوارتز (%)	AAC مع الرماد المتطاير (%)	AAC مع الرماد المتطاير (%)
مسحوق الكوارتز	25.4	34.7	بدون مواد عائدة	بدون مواد عائدة
الرماد المتطاير			41.7	41.1
المواد العائدة الجافة	10			9
الإسمنت البورتلاندي	14	14.7	19.7	10.2
الكلس الحي	9	9.4	4.8	3.5
الألمنيوم	0.05	0.04	0.07	0.04
الجبس	1.8	1.8	1.7	1.7
الماء	39.8	39.4	32.1	34.5

⁴ الزيوليتي: الرماد المتطاير المفاعل بشكل مسبق مع المحلول القلوي NaOH

تضيف الكميات الصغيرة من الزيوليتات والمستبدلة بالرماد المتطاير التقليدي و المواد العائدة بعضاً من الصلابة إلى عينات AAC التقليدية وذلك بسبب أن الزيوليت يمتلك سطح نوعي داخلي كبير مما يجعله قادر على استيعاب معظم المعلق.

لقد تبين للباحثين أن 40% من الرماد المتطاير المعالج مسبقاً يستبدل بـ 40% من الرماد المتطاير لمزيج AAC التقليدي، وهذا ما يجعل AAC أفسى بـ 5% عن التقليدي. بالنتيجة فإن استبدال ضئيل بالزيوليتات بالطريقة المذكورة آنفاً يقود إلى زيادة ضئيلة في الأداء، وهذه الزيادة تعتبر عديمة الأهمية قياساً إلى الجهد المبذول لتحقيقها.

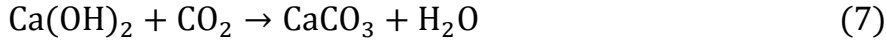
أورد الباحثون **Dicola et Al. (2004) [29]** الأهمية الإقتصادية لـ AAC:

- إن الطاقة الإجمالية المهدورة على عملية إنتاج AAC بما فيها الطاقة المستهلكة في تصنيع الإسمنت البورتلاندي والكلس ومسحوق الألمنيوم هي 1000 MJ/m^3 .
- إن استخدام الرماد المتطاير (الناتج عن المنشآت الصناعية المختلفة) في إنتاج AAC بدلاً من مسحوق الكوارتز يساهم في تخليصنا من مخلفات المنشآت الصناعية (المحطات الحرارية)، كما أنه يوفر من الطاقة المهدورة في تصنيع مسحوق الكوارتز.
- إن عملية المعالجة التي تتم باللاوتوكلاف (معالجة بدرجة حرارة 180°C وضغط 12 bar) هي اقتصادية نوعاً ما نسبةً إلى أفران التجفيف التقليدية التي تصل درجات حرارة الشئ فيها إلى 1000°C .
- نحتاج إلى 1m^3 فقط من مواد التشكيل الأولية لتصنيع $3-4 \text{ m}^3$ من AAC نتيجة البنية الخلوية لـ AAC، وإن كان AAC مكلف في إنتاجه، إلا أنه يستخدم في ظروف البناء الاستثنائية (الطرق السريعة و المباني المقاومة للانفجارات). كما أنه يشكل صديقاً بديلاً للبيئة ونتيجةً لصعوبة تطبيق الرغوية باستخدام المحلول القلوي الذي يحتوي المزيج مع مسحوق الألمنيوم، فإن الرماد المتطاير يستخدم لتخفيض كثافة المنتج النهائي.

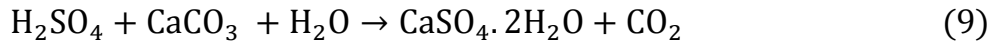
درس الباحثون **Carlsson et al. (2003) [30]** البنية الميكروية لـ AAC⁵ مع تأثير الكرينة على المقاومة الميكانيكية لـ AAC، حيث أن ما يقارب من 80% من حجم المادة المتصلبة يتكون من المسام التي تتميز بقدرتها على نقل الرطوبة اعتماداً على الخاصية الشعرية، والبنية الميكروية للمادة الصلبة تتكون بشكل رئيسي من صفائح البلورات الميكروية للتوبرموريت C-S-H.

⁵AAC: Aerated Autoclaved Concrete

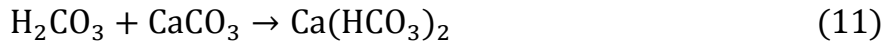
إن الكربنة هي إحدى آليات التدهور الرئيسية التي يمكن أن تؤثر على متانة وعمر الخرسانة بشكل عام، وتحدث الكربنة عندما يتفاعل البورتلانديت $[Ca(OH)_2]$ وغيره من الأطوار التي تحمل الكالسيوم (التوبرموريت) C-S-H مع ثاني أكسيد الكربون لتشكيل الكالسيت $(CaCO_3)$.



تتسارع عملية التدهور من خلال تراكيز عالية من ثاني أكسيد الكبريت المتواجد في الهواء حيث يتفاعل SO_2 بوجود الرطوبة ليشكل حمض الكبريتي، وبواسطة الأوكسجين الجوي، تتم أكسدة حمض الكبريتي إلى حمض الكبريت، الذي يهاجم كربونات الكالسيوم وتتشكل بلورات الجبس كمنتج للتفاعل:



يشكل ثنائي أوكسيد الكربون وبوجود الرطوبة حمض الكربون، الذي يتفاعل مع $CaCO_3$ وهذا ينتج بيكربونات الكالسيوم المنحلة في الماء ليحدث التآكل كنتيجة لفقدان الكالسيوم بعد الغسيل الفعال (effective washout).



قام الباحثون **Guglielmi et Al. (2004) [31]** بدراسة المقاومة الميكانيكية والمسامية ل-⁶ACCC (الخرسانة الخلوية الغضارية المعالجة بالاوتوكلاف) مع مادة رابطة وفق النسب: 75% غضار الكاؤولين مع 25% إسمنت بورتلاندي، مع تغيير نسب مسحوق الألمنيوم المضافة ضمن المجال % (0.2 – 0.8)، ليتم الحصول على عينات مختلفة المسامية. ولقد تبين أن العينات مع محتوى عالٍ من الألمنيوم تنتج مسام ملتحمة، كما أن التجفيف بالاوتوكلاف يزيد من المقاومة الميكانيكية، وهذا الأمر يؤكد كونه AAC المجفف بالاوتوكلاف لدرجات حرارة عالية (190 °C) يتمتع بمقاومة ميكانيكية عالية أعلى بكثير من ⁷NAAC المجفف بدرجة حرارة الغرفة الرطبة حيث أنه بوجود الاوتوكلاف تحقق المادة بنيتها المايكروية النهائية لأن NAAC يخضع لتغيرات مجهرية مع مرور الوقت ويخضع بالتالي لتغيرات بطيئة وتدرجية على مقاومته الميكانيكية. من ناحية أخرى تتم معالجة ⁸CCC (الخرسانة الخلوية الغضارية) عند درجة حرارة (20 °C) تحت رطوبة نسبية 90% وبالتالي تكون التفاعلات بين غضار الكاؤولين والإسمنت البورتلاندي بطيئة جداً بدرجة حرارة الغرفة، ومثل هذه المادة قد تحتاج شهراً قبل أن تحقق مقاومتها الميكانيكية المطلوبة.

⁶ ACCC: Autoclaved Clayey Cellular Concrete

⁷ NAAC: Non Aerated Autoclaved Concrete

⁸ CCC: Clayey Cellular Concrete

قام الباحثون **Song et al. (2009) [32]** بدراسة الوسط المسامي، اعتماداً على الهندسة الكسيرية، في حالة التشابه ذاتي بشكل إحصائي (الوسط المسامي الحقيقي) ويمثل عدد المسام بالعلاقة التي وردت سابقاً في الهندسة الكسيرية:

$$N(L \geq \lambda) \sim \left(\frac{\lambda_{max}}{\lambda}\right)^{D_f}$$

حيث أن:

D_f البعد الكسيري لسطح المسام.

λ حجم المسام من λ_{min} وحتى λ_{max} .

يتضمن التشابه الذاتي الإحصائي مجموعة من المسام الكسيرية في هذا المجال، وبالتالي يمكن الحصول على عدد المسام ذات الأحجام التي تتراوح من λ وحتى $\lambda + d\lambda$ من المعادلة:

$$-dN = D_f \lambda_{max}^{D_f} \lambda^{-(1+D_f)} d\lambda \quad (12)$$

في حال كانت $d\lambda \rightarrow 0$ فإن المعادلة (12) لا يمكن الحصول عليها.

تتغير $d\lambda$ في الوسط المسامي الحقيقي الذي يقبل التماثل الذاتي الإحصائي بشكل بطيء وتتقارب نحو القيمة الدنيا، كما تميل dN نحو اللانهاية. من الجدير بالذكر أنه لا تميل كل الأوساط المسامية إلى الصفر، في حين يشير الجانب السالب من المعادلة (12) إلى أن عدد المسام يتناقص بازدياد حجم المسام حيث تصف والمعادلة (11) علاقة حجم المسام بتراكم المسام ويمكن الحصول على العدد الإجمالي للمسام من المعادلة:

$$-N_t(L \geq \lambda_{min}) = \left(\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}\right)^{D_f} \quad (13)$$

ويدمج المعادلتين (11 و 12):

$$-\frac{dN}{N_t} = D_f \lambda_{min}^{D_f} \lambda^{-(1+D_f)} d\lambda = f(\lambda). d\lambda \quad (14)$$

حيث أن $f(\lambda) = D_f \lambda_{min}^{D_f} \lambda^{-(1+D_f)} \geq 0$ هو تابع الكثافة الاحتمالية وبإجراء التكامل:

$$\int_0^\infty f(\lambda). d\lambda = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f(\lambda). d\lambda = 1 - \left(\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}}\right)^{D_f} \equiv 1 \quad (15)$$

وهذا يعني أن المعادلة (15) تصبح صالحة إذا كانت:

$$\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}} \cong 0 \quad (16)$$

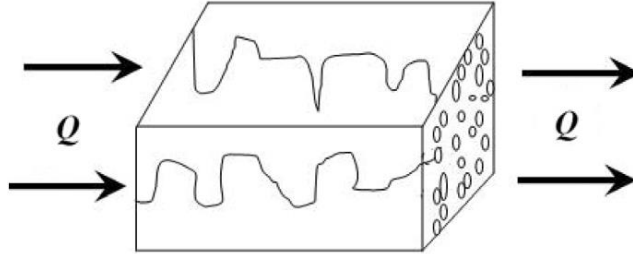
في حال كانت $\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}} \leq 0$: تطبق النظرية الكسيرية لتحليل خصائص الوسط المسامي وتحسب ϕ

(المسامية) من العلاقة:

$$\phi = \left(\frac{\lambda_{min}}{\lambda_{max}}\right)^{d-D_f} \quad (17)$$

حيث أن d هو البعد الإقليدي ويأخذ القيمتين (2,3) من أجل الأوساط ثنائية وثلاثية البعد. يمكن اعتبار الوسط المسامي على شكل حزمة من الأنابيب الشعيرية المتعرجة (كما هو موضح في الشكل (33-1) مع مقاطع عرضية مختلفة (بقطر) λ وطول تعرجي $L_t(\lambda)$ كما يلي:

$$L_t(\lambda) = \lambda^{1-D_t} L_0^{D_t} \quad (16)$$



الشكل (33-1) الرسم التخطيطي للتوصيل الحراري في الوسط المسامي

حيث أن $1 < D_t < 2$ هو البعد التعرجي الكسيري في الوسط ثنائي البعد، وبازدياد هذا البعد تزداد درجة النفاذ هذه الأنابيب الشعيرية، و توافق القيم $D_t = 1,2$ شعيرات مستقيمة لأن تعرجاً كبيراً للخط يعني أنه يمكن أن يملأ كامل المساحة بالنفاذ ويمكن اعتبار المسام في المقطع العرضي دوائر بأقطار مختلفة λ وتعطى مساحة المسام الإجمالية بالعلاقة الآتية:

$$A_p = - \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \pi (\lambda/2)^2 \cdot dN$$

$$= \frac{\pi D_f \lambda_{max}^2 (1 - \phi)}{4(2 - D_f)} \quad (18)$$

قام الباحثون **Kou et al. (2009) [33]** بدراسة الوسط المسامي ثنائي الطور (وهذا يوافق الحالة الرطبة باعتماد التشابه الذاتي الإحصائي) لتكون المقاومة الحرارية للطور الغازي بالشكل التالي:

$$r_g(\lambda) = \frac{4L_t(\lambda)}{\pi \lambda^2 k_g} \quad (19)$$

حيث أن k_g معامل التوصيل الحراري للطور غير الرطب وبإجراء التكامل:

$$\frac{1}{R_g} = - \int_{\lambda_{min,g}}^{\lambda_{max,g}} \frac{1}{r_g} dN \quad (20)$$

نحصل على المقاومة الإجمالية من أجل الطور الغازي:

$$R_g = \frac{4L_0^{D_t} (D_t - D_{f,g} + 1)}{\pi k_g D_{f,g} \lambda_{max,g}^{D_t+1} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{min,g}}{\lambda_{max,g}} \right)^{D_t - D_{f,g} + 1} \right]} \quad (21)$$

حيث أن:

$$\begin{aligned}\lambda_{max,g} &= \lambda_{max}\sqrt{1 - S_w} \\ \lambda_{min,g} &= \lambda_{min}\sqrt{1 - S_w} \\ D_{f,g} &= 2 + \frac{\ln[(1 - S_w)\phi]}{\ln \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}}\end{aligned}$$

$D_{f,g}$ يمثل البعد الكسيري للطور الغازي

وتكون المقاومة من أجل الطور الصلب:

$$R_s = \frac{L_0}{(1 - \phi)Ak_s} \quad (22)$$

حيث أن k_s معامل التوصيل الحراري للطور الصلب

وتكون المقاومة من أجل الوسط المسامي المشبع (الرطب) نكتب:

$$\begin{aligned}R_w &= \frac{4L_0^{D_t}(D_t - D_{f,w} + 1)}{\pi k_w D_{f,w} \lambda_{max,w}^{D_t+1} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{min,w}}{\lambda_{max,w}}\right)^{D_t - D_{f,w} + 1}\right]} \quad (23)\end{aligned}$$

حيث أن: $D_{f,w}$ يمثل البعد الكسيري للطور الرطب

k_w معامل التوصيل الحراري للطور الرطب، ويكون:

$$\begin{aligned}\lambda_{max,w} &= \lambda_{max}\sqrt{S_w} \\ \lambda_{min,w} &= \lambda_{min}\sqrt{S_w} \\ D_{f,w} &= 2 + \frac{\ln[(1 - S_w)\phi]}{\ln \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}}\end{aligned}$$

$$k_e = \frac{1}{R_t} \frac{L_0}{A} = \frac{L_0}{A} \left(\frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_w} \right)$$

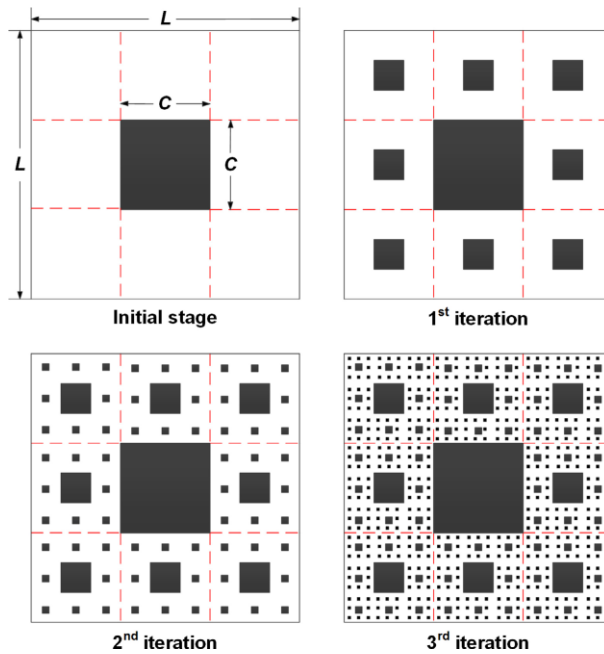
$$\begin{aligned}k_e &= \frac{L_0}{k_g A} \frac{\pi k_g D_{f,g} \lambda_{max,g}^{D_t+1} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{min,g}}{\lambda_{max,g}}\right)^{D_t - D_{f,g} + 1}\right]}{4L_0^{D_t}(D_t - D_{f,g} + 1)} \\ &+ \frac{(1 - \phi)Ak_s}{L_0} \\ &+ \frac{\pi k_w D_{f,w} \lambda_{max,w}^{D_t+1} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{min,w}}{\lambda_{max,w}}\right)^{D_t - D_{f,w} + 1}\right]}{4L_0^{D_t}(D_t - D_{f,w} + 1)} \quad (24)\end{aligned}$$

(22)

لنحصل أخيراً على معامل التوصيل الفعال اللابعدى:

$$k^+ = \frac{k_e}{k_g} \quad (25)$$

قدم الباحثون **Jin et al. (2016) [34]** دراسة تجريبية وتحليلية لتحديد معامل التوصيل الحراري للخرسانة المشبعة بالهواء AAC وفق الهندسة الكسيرية (fractal geometry) باعتماد حصيرة سيرينسكي (التشابه الذاتي التام). تم تمثيل الوسط المسامي (البنية المسامية) للخرسانة حيث يتم التقسيم اعتباراً من خلية واحدة بطول ضلع L مع مربع مركزي (في الوسط) طول ضلعه C . تمثل المربعات السوداء المادة الصلبة، وتمثل المربعات البيضاء المسام، يتم تكرار تقسيم المربعات البيضاء بنفس الأسلوب إلى عدد n من المرات ألا وهو التشابه مع الوسط الحقيقي من خلال التطابق بين القيم المحسوبة والمقاسة للخواص الفيزيائية للوسط إن أبسط هذه الحالات توافق $L=3$ و $C=1$ كما هو موضح بالشكل (34-1).



الشكل (34-1) دراسة الوسط المسامي وفق حصيرة سيرينسكي حيث أن $L=3, C=1$

قام الباحثون بقياس المسامية والكثافة الظاهرية لثلاث عينات من AAC في الحالة الجافة. تم بعد ذلك ترطيب العينات باستخدام البخار بالماء بدلاً من الرش اليدوي للحصول على عينات مشبعة جزئياً، في حين تم الحصول على العينات المشبعة كلياً بغمر العينات بشكل كامل بالماء في حجرة تخلية (Vacuum). تم بعدها اختبار الإيصالية الحرارية عن طريق جهاز يستخدم تقنية المنبع ذو السطح المستوي TPS⁹ والذي يحتاج لدقائق معدودة فقط لتحقيق الاستقرار الحراري. تم فرض قيم معينة لـ L, C ، وتم حساب البعد الكسيري D_f .

يتحدد البعد الكسيري وفق العلاقة:

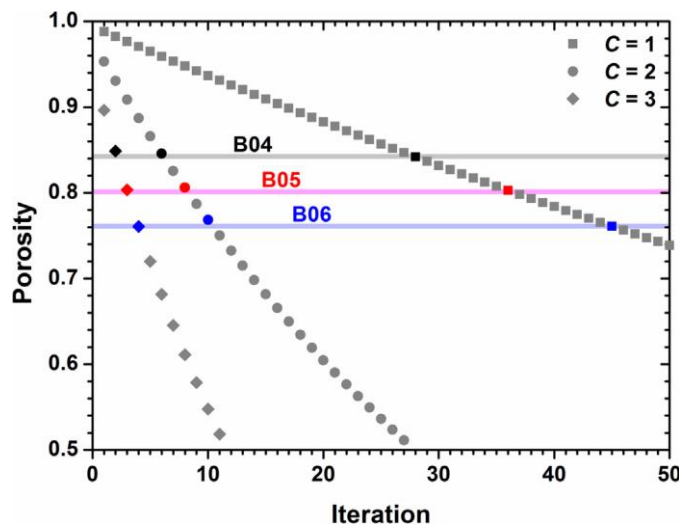
⁹ TPS: Transient Plane Source

$$D_f = \frac{\ln(L^2 - C^2)}{\ln L} \quad (26)$$

تحدد المسامية وفق العلاقة:

$$\phi = \left(\frac{L^2 - C^2}{L^2} \right)^{n+1} \quad (27)$$

لتحديد رقم التكرار، تم قياس المسامية لـ 3 عينات AAC مختلفة عن بعضها البعض في الكثافة، ثم رُسمت ثلاثة منحنيات تمثل $C=1, C=2, C=3$ مع فرض قيمة $L=13$. تم إيجاد رقم التكرار المناسب لكل عينة من خلال المقارنة بين القيمة التجريبية المقاسة لمسامية العينة (المتملة بالمستقيم B04) والقيمة المحسوبة لمسامية كل عينة ولكل تكرار، وفق الشكل:



الشكل (1-35): تحديد رقم التكرار تجريبياً [24]

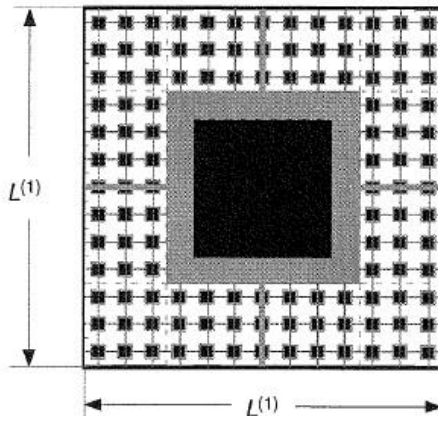
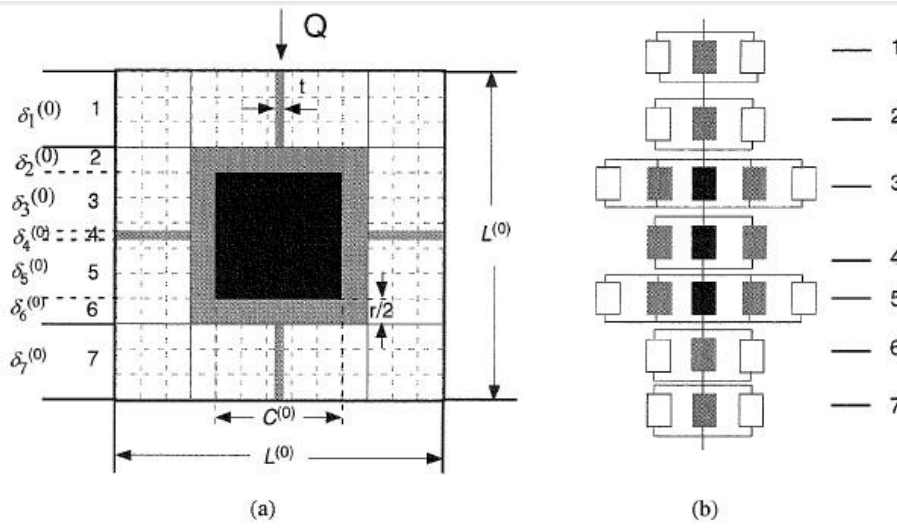
وبحسب الباحث **Feng et Al. (2007) [35]** فإن المحاكاة تتم أيضاً بحصيرة سيرينسكي، حيث تمثل المناطق البيضاء والسوداء، المسام والجزيئات على الترتيب، وبعتماد $L=13, C=5$ كما هو موضح بالشكل (1-36)، حيث يمثل اللون الرمادي الطور الرطب (الذي يكون على شكل ماء أو بخار ماء) فإن تواجد الرطوبة في هذا التمثيل ينقسم إلى:

- الطور الرطب المحيط بالجزيئات الصلبة بسماكة $r/2$
 - الطور الرطب الممتلئ بالحوجز ذات السماكة t التي تصل بين الجزيئات
- ويكون معامل التوصيل الحراري الفعال اللابيدي من أجل المرحلة (0) الابتدائية:

$$k_{e,sc}^{+(0)} = \frac{k_{e,sc}^{(0)}}{k_g} = \frac{L^{(0)}}{R^{(0)} \cdot A^{(0)} \cdot k_g}$$

$$A^{(0)} = L^{(0)} \times 1$$

$A^{(0)}$ تمثل المساحة الكلية للمقطع العرضي الظاهر



الشكل (1-36): حصيرة سيرينسكي [25]

$$\begin{aligned}
 k_{e,sc}^{+(0)} = & \left\{ \frac{1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}}{\left[(1 - t^{(0)+}) + \beta_{wg}^{(0)} \cdot t^{(0)+} \right]} \right. \\
 & + \frac{r^{(0)+}}{\left(1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{wg}^{(0)} \left(\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} + r^{(0)+} \right)} \\
 & + \frac{\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} - t^{(0)+}}{\left(1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{wg}^{(0)} r^{(0)+} + \beta_{sg}^{(0)} \cdot \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}} \\
 & \left. + \frac{t^{(0)+}}{\left[\beta_{wg}^{(0)} \left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{sg}^{(0)} \cdot \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right]} \right\}^{-1}
 \end{aligned} \tag{28}$$

$$k_{e,sc}^{+(1)} = \frac{k_{e,sc}^{(1)}}{k_g}$$

$$\beta_{wg}^{(1)} = \frac{\beta_{wg}^{(0)}}{k_{e,sc}^{+(0)}}$$

$$\beta_{sg}^{(1)} = \frac{\beta_{sg}^{(0)}}{k_{e,sc}^{+(0)}}$$

$$\beta_{wg}^{(0)} = \frac{k_w}{k_g}$$

$$\beta_{sg}^{(0)} = \frac{k_s}{k_g}$$

حيث أن k_w, k_s, k_g معاملات التوصيل الحراري للغاز (هواء) وللصلب (اسمنت) وللماء (رطوبة) على التسلسل، ومن أجل تكرار لـ (n) مرة نطبق المعادلات السابقة نفسها بدلالة (n).

قام Cai وآخرون (2017) [36] بتمثيل بنية الصخور وفق الهندسة الكسيرية، وحساب معامل الانتقال الحراري الفعال للصخور عن طريق تحديد المسامية تجريبياً مع البعد الكسيري D_f والقطر الأعظمي والأصغري Z_{min}, Z_{max} لحبات الرمل المكونة للصخور وفق الجدول (6-1)، ويتم ذلك بدراسة توزيع الجزيئات وفق الحجم الحبي لها عن طريق نخل الرمل المكون للصخور باستخدام مناخل بأقطار مختلفة، وحساب الوزن المتراكم في كل منخل ثم يتم نسبه إلى الوزن الكلي للجزيئات كنسبة مئوية Weight(%).

جدول (6-1): التوزيع الحجمي (الحبي) والوزني لجزيئات الرمل المكونة للصخور [36]

Particle Size mm (in.)	Weight (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
0.045-0.1 (0.002-0.004)		5.94		53.41			20.85
0.1-0.125 (0.004-0.005)		1.33		2.44			2.46
0.125-0.15 (0.005-0.006)		1.30		2.07			2.23
0.15-0.2 (0.006-0.008)		2.53		3.43			3.95
0.2-0.7 (0.008-0.028)	17.04	23.17	67.49	17.47	67.41	37.42	25.68
0.7-1.3 (0.028-0.051)	12.71	25.56	8.90	10.39	8.88	13.57	20.01
1.3-1.6 (0.051-0.063)	6.11	12.30	3.24	3.79	3.24	5.58	8.22
1.6-2.3 (0.063-0.091)	13.86	27.86	6.00	7.00	5.99	11.25	16.59
2.3-2.6 (0.091-0.102)	5.80		2.13		2.12	4.29	
2.6-3 (0.102-0.118)	7.63		2.54		2.54	5.35	
3-4 (0.118-0.157)	18.66		5.34		5.34	11.98	
4-5 (0.157-0.197)	18.20		4.37		4.35	10.56	

أوضح الباحثون Li et al. (2017) [37] أنه وفقاً للنظرية الكسيرية بتشابه ذاتي تام، فإن توزيع

الجزيئات في النظام الكسيري يعطى بالعلاقة:

$$n_{(R \geq r)} = c r^{-Df} \quad (29)$$

حيث يمثل r القطر المكافئ للجزيئات، $n_{(R \geq r)}$ هو عدد الجزيئات التي قطرها أكبر أو يساوي r ، c هو ثابت كما أن D_f هو البعد الكسيري.

عندما تكون r مساوية للقطر الأصغري r_0 فإن العدد الإجمالي للجزيئات ذات القطر الأصغري هو:

$$n_0 = c r_0^{-D_f} \quad (30)$$

والحجم التراكمي للجزيئات التي قطرها أكبر من r هي:

$$dV_{(R \geq r)} = -kn_0 r_0^{D_f} D_f r^{2-D_f} dr \quad (31)$$

حيث أن k هو معامل الحجم، وبإجراء التكامل على المعادلة (33) يكون:

$$\int_{V_0}^{V_{(R \geq r)}} dV_{(R \geq r)} = \int_{r_0}^r -kn_0 r_0^{D_f} D_f r^{2-D_f} dr \quad (32)$$

$$V_0 - V_{(R \geq r)} = \frac{kn_0 r_0^{D_f} D_f}{3 - D_f} r^{3-D_f} \quad (33)$$

حيث أن V_0 هو الحجم التراكمي الإجمالي للجزيئات ذات القطر الأصغري

كما أن $V_{(R \geq r)}$ هو حجم الجزيئات التي قطرها أكبر من r

الجزء $\frac{kn_0 r_0^{D_f} D_f}{3 - D_f}$ يعبر عن معامل يتعلق بخصائص المادة ويمكن أن يشار إليه بالرمز K_v لنحصل

على:

$$V_0 P\% = K_v r^{3-D_f} \quad (34)$$

تمثل $P\%$ النسبة المئوية للحجم التراكمي للجزيئات ذات القطر الأصغر من r وذلك عندما يكون حجم

الجزيئة أكبر من R_i من $(R_i > R_{i+1})$ حيث أن $i=1,2,3\dots$. عندما تكون $R_i = 0$ فإن $V(r > R_i)$ في

المعادلة (33) تمثل الحجم الكلي لكل جزيئات V_T أي أن:

$$\frac{V(r > R_i)}{V_T} = 1 - \left(\frac{R_i}{R_{max}} \right)^{3-D_f} \quad (35)$$

قام الباحثون **Hikmet et al. (2011) [38]** باستخدام العلاقة التالية لحساب البعد الكسيري (بعد

اشتقاق D_f من المعادلة (35)):

$$D_f = - \frac{\ln \left[\frac{M(r > R_i)}{M_T} * \left(\frac{R_{max}}{R_i} \right)^3 \right]}{\ln \left(\frac{R_i}{R_{max}} \right)} \quad (36)$$

حيث تمثل:

$M(r > R_i)$ الكتلة المتراكمة للجزيئات ذات القطر R_i

M_T الكتلة الإجمالية للجزيئات

7-1 خلاصة الدراسة المرجعية

يتضح من الدراسات [11,12,30] أنه لا يمكن استخدام حمض الكبريت كعامل تمدد للخرسانة الإسمنتية لأنه يؤثر سلباً على المقاومة الميكانيكية، بالإضافة إلى التأثير السلبي للمياه الكبريتية والتأثير السلبي للعوامل الجوية (رطوبة محملة بغاز ثنائي أكسيد الكبريت وغاز ثنائي أكسيد الكربون)، حيث يؤدي تشكل كبريتات الكالسيوم إلى بنية هشّة.

يتضح من الدراسة [31] أنه يمكن تطبيق استخدام غضار الكاؤولين كمادة أساس للخرسانة الخلوية وذلك بوجود مادة بوليميرية، وأنه لا يمكن استخدام (الغضار) بشكل مباشر. تزداد مسامية عينات (Autoclaved Clayey Cellular Concrete) بازدياد نسبة مسحوق الألمنيوم المضافة حتى النسبة 0.4% حيث تصل المسامية إلى 83% لتتناقص بعدها المسامية كلما ازدادت نسبة مسحوق الألمنيوم لتصل إلى 78% عندما تكون نسبة مسحوق الألمنيوم 0.8%. تسلك الكثافة الظاهرية السلوك نفسه، حيث تنخفض بازدياد نسبة مسحوق الألمنيوم لتصل إلى 450 kg/m^3 ثم تعود لترتفع لتصبح (عند النسبة 0.8% للألمنيوم) 550 kg/m^3 . أما المقاومة الميكانيكية فهي تنخفض في البداية مع ارتفاع المسامية، ثم ترتفع بانخفاض المسامية وارتفاع نسبة مسحوق الألمنيوم المضاف لتصل إلى 0.65 Mpa .

يتبين لنا من الدراسات [13,14,15] أنه يمكن دمج الإسمنت مع مادة عازلة (وهي هنا الأيروجيل) لأن الإسمنت يرفع من المقاومة الميكانيكية للمادة ويخفض من كلفة استخدام الأيروجيل بمفرده كمادة عازلة، وأن الأيروجيل يخفض من الإيصالية الحرارية للمادة ككل. يمكن أيضاً تحضير عينة أيروجيل من أساس غضاري وهذا يعني تكلفة أقل من تكلفة استخدام الأيروجيل منفرداً. تتراوح الإيصالية الحرارية لعينات الأيروجيل المحضرة بوجود الاسمنت ضمن المجال $(0.1 - 0.6) \text{ W/mK}$ وذلك لدى تغيير نسبة الأيروجيل ضمن عينات الاسمنت بالمجال (0.2-0.5%) ويتم الحصول على مقاومات ميكانيكية لا تتجاوز 0.5 Mpa .

بينت الدراسات [11,16] أن تفاعل الإماهة للإسمنت يمر بعدة مراحل وأن الاسمنت يحتاج إلى فترة من الزمن ليكتسب المقاومة الميكانيكية المطلوبة، ويمر بعدة مراحل، وأن الكلس هو أحد مكونات الخرسانة الخلوية. هذا وتلعب نعومة المواد المضافة دوراً كبيراً في تحسين خصائص الخرسانة الناتجة (ازدياد السطح النوعي).

يتضح من الدراسات [15,28,29] أن الخرسانة المشبعة بالهواء (الخلوية) يتم تحضيرها من الكلس والإسمنت ومسحوق الألمنيوم، ويمكن استخدام الرمل أو مسحوق الكوارتز أو الرماد المتطاير الناتج عن مخلفات

محطات احتراق الوقود. كما يمكن استخدام رماد معالج بـ NaOH للحصول على عينات خرسانية بأداء أفضل ومقاومة ميكانيكية أعلى وأن نسبة الكلس الحي المضاف تبقى ضمن حدود % (10-15).

بينت الدراسات [2,27] أن الخرسانة الاسمنتية تعالج إما بغمر العينات بالماء (لمدة 28 يوم) أو بالترطيب (إما بالرش اليدوي للعينات أو عن طريق البخار المطبق ضمن الاوتوكلاف).
تفيد الدراسات [10,14,40] بأن أحد مكونات القرميد الرئيسية هي الغضار وتقود زيادة السيليكا في الغضار إلى تخفيض انكماش القرميد أثناء التجفيف والحرق، وتقود كبريتات الكالسيوم - إن وجدت - إلى بنية اسفنجية للقرميد.

يتبين من الدراستين [32,33] أنه يمكن بتطبيق الهندسة الكسيرية دراسة الأوساط المسامية إما عن طريق التشابه الذاتي التام (حصيرة سيرينسكي) أو عن طريق التشابه الإحصائي (الوسط الحقيقي).
يتبين من الدراستين [34,35] أنه يمكن تمثيل الوسط المسامي للمادة العازلة، باستخدام حصيرة سيرينسكي (الهندسة الكسيرية) وتحديد أبعاد الوسط، باتباع عدة مراحل من التكرار، لحين تحديد معامل التوصيل الحراري تحليلياً (نظرياً).

يتبين من الدراسات [36,37,38] أنه يمكن تمثيل بنية الصخور وتحديد البعد الكسيري باستخدام التوزع الحجمي الحبي لحبات الرمل المكونة للصخور، ويمكن أن يطبق هذا التمثيل على البنية المسامية للعينات المختبرة في هذه الأطروحة، حيث يتم نخل جزيئات الإسمنت الجافة قبل مزجها مع الماء لتشكل ملاط العينات المختبرة، و يتم من خلال النخل، تحديد التوزع الحبي والوزني لجزيئات الاسمنت وتحديد البعد الكسيري للوسط.
يتضح من المراجع [17,...,22] أنه تمت دراسة معامل التوصيل الحراري للأوساط المسامية والمواد المركبة باستخدام طريقة حجوم العناصر المنتهية وطريقة الفروق المنتهية، بالإضافة إلى دراسة تأثير الرطوبة على معامل التوصيل الحراري بالاعتماد على الخاصية الشعرية للرطوبة ضمن المسام.
نستخلص أهم النقاط المطبقة في هذه الأطروحة بناءً على الدراسات المرجعية والأبحاث المتعلقة بتصنيع خرسانة خلوية والاختبارات المطبقة عليها:

- سيتم إهمال تصنيع عينة أيروجيل في هذه الأطروحة لعدم توفر النتروجين السائل وللتكلفة الاقتصادية الناتجة عن عملية التجفيد.
- سيتم إهمال استخدام حمض الكبريت في هذه الأطروحة كعامل توسع للإسمنت في سبيل تحقيق تفاعل كيميائي يقود إلى بنية مسامية (خلوية).

- سيتم إهمال استخدام الغضار في هذه الأطروحة كمادة عازلة بشكل منفرد أو مدمج مع الإسمنت دون معالجة أو الدمج مع أحد البوليميرات الرابطة لتحقيق التماسك والصلابة بسبب التكلفة المادية الإضافية للمعالجة.
- سوف نعتمد مسحوق الألمنيوم كعامل توسع للإسمنت في سبيل تحقيق تفاعل كيميائي يقود إلى بنية مسامية (خلوية).
- سوف نعتمد إضافة ملح كلوريد الصوديوم لزيادة المسامية في العينة، بالاعتماد على (تحليل كلوريد الصوديوم باستخدام حواجز بيتونية مسامية).
- سنعتمد معالجة العينات في هذه الأطروحة دون استخدام الاوتوكلاف في سبيل تحقيق الجدوى الاقتصادية من العينة الإسمنتية المحضرة، حيث تمت المعالجة عن طريق إضافة الماء للعينة بشكل مستمر ثم التجفيف والمعالجة تحت تأثير الشروط المحيطة من ضغط ودرجة حرارة.
- سنعتمد الهندسة الكسيرية في هذه الأطروحة في الدراسة التحليلية دون فرض أبعاد الوسط المسامي، وإنما تم تحديد أبعاد هذا الوسط بالاستعانة بتحديد البعد الكسيري تجريبياً (على خلاف الدراسات المرجعية السابقة)، عن طريق دراسة التوزع الحجمي والحيبي لجزيئات الإسمنت الجافة قبل تحويلها إلى ملاط العينة الإسمنتية المحضرة.
- ستتم نمذجة معامل التوصيل الحراري في الدراسة التحليلية (في الحالتين الجافة والرطبة)، ودراسة تغير الثابت التجريبي الذي يربط القيم النظرية بالتجريبية باستخدام برنامج MATLAB.

الفصل الثاني

أهمية البحث وأهدافه

1-2 أهمية البحث وأهدافه

يقدم البحث أحد حلول العزل الحراري المتاحة بصورة تتلاءم مع صعوبة الظروف التي مر بها الوطن من انقطاع دام لفترات طويلة من ماء وكهرباء، بالإضافة إلى عدم توفر بعض مواد العزل (الأيروجيل) لارتفاع ثمنها أولاً ولصعوبة استيرادها أو تصنيعها ثانياً وبالتالي تتلخص أهمية البحث بالنقاط الآتية:

1. الاستفادة من المواد الخام الطبيعية المتوفرة بكثرة في أراضي الجمهورية العربية السورية واستخدامها في صناعة مواد العزل والبناء، والتي تعد من أهم الصناعات التي يحتاج إليها الوطن في الوقت الحاضر.
2. ردف الصناعة السورية بصناعة جديدة لم تطبق بعد محلياً، وهي صناعة بعض مواد العزل والبناء، تلك المواد التي يتم استيرادها بالقطع الأجنبي وبأسعار مرتفعة، وبالتالي سوف تساهم هذه الدراسة بتوفير مبالغ كبيرة وتأمين فرص عمل لشريحة واسعة من الصناعيين.
3. الاستفادة من مخلفات ورش تصنيع الألمنيوم وبالتالي توفير كلفة الألمنيوم النقي والحفاظ على البيئة.
4. توفير الجهد والمال المبذول على استهلاك الطاقة نتيجة تدفئة وتكييف المباني والمرافق العامة.

وتتلخص أهداف البحث بالسعي إلى:

1. تحضير عينات عازلة بالاستفادة من الغضار المحلي مع إضافات من الاسمنت البورتلاندي بوجود عامل توسع للاسمنت وهو H_2SO_4 .
2. تحضير عينات عازلة بالاستفادة من الغضار المحلي مع الاسمنت البورتلاندي بوجود إضافات من مخلفات الألمنيوم.
3. تحضير عينات عازلة من الاسمنت البورتلاندي بوجود إضافات من الكلس الحي.
4. تحضير عينات عازلة من الاسمنت البورتلاندي بوجود إضافات من كلوريد الصوديوم.
5. تحضير عينات عازلة من الاسمنت البورتلاندي بوجود إضافات من كربونات الكالسيوم.

كان الهدف من الاستعانة بنسب قليلة من ملح كلوريد الصوديوم هو تحقيق مسامية إضافية، لذلك تم تحضير سلسلة من العينات بتركيب كيميائي واحد مع نسب مختلفة من الملح المضاف (5%-10%-15%)، لدراسة تأثيره على خواص العينة: الإيصالية الحرارية، والمقاومة الميكانيكية لاختيار النسب الملائمة من الملح. تم اختبار مواصفات العينات الناتجة بإخضاعها لاختبارات المسامية والكثافة الظاهرية والإيصالية الحرارية والمقاومة الميكانيكية (لتقدير قابلية تطبيقها في البناء)، وتحديد معامل امتصاص الصوت تجريبياً لمعرفة قدرتها على امتصاص الضجيج.

هذا ويهدف البحث إلى تحديد معامل التوصيل الحراري للعينات في الحالة الرطبة وفي الحالة الجافة (لدراسة تأثير الشروط الجوية المختلفة من جفاف ورطوبة على أداء العازل الحراري)، حيث ينخفض أداء العازل الحراري في الحالة الرطبة بسبب وجود الماء على شكل بخار أو سائل ضمن المسامات، فتسبب ارتفاع الإيصالية الحرارية.

لدعم الدراسة التجريبية السابقة بالدراسة التحليلية، سنجأ إلى نمذجة الوسط المسامي اعتماداً على الهندسة الكسيرية (حصيرة سيرينسكي) ليتم تحديد أبعاد البنية المسامية (الوسط المسامي) للعينة، مع حل جملة المعادلات التفاضلية باستخدام برنامج MATLAB وتحديد البعد الكسيري بدراسة التوزع الحجمي لجزيئات الإسمنت ومن ثم دراسة تأثير الرطوبة على معامل التوصيل الحراري الفعال.

الفصل الثالث

القسم العملي

3-1 مقدمة

تم -في الدراسة المرجعية- استعراض طريقة تحضير عينة أيروجيل من أساس غضاري، حيث تم مزج المونتموريولونيت¹⁰ المبادل بالصوديوم بماء منزوع الشوارد ليتم تجميده بالنتروجين السائل¹¹ بشكل لحظي، ليتم تجفيفه (في المجفدة) لفترة زمنية تتعدى ستة ساعات، لانتزاع السائل من العينة دون أن يسبب ذلك انهيار المادة الصلبة. لم يتوفر النتروجين السائل بسبب ظروف العمل الصعبة في بداية الأطروحة، وبعد عملية بحث استغرقت أكثر من ثلاثة شهور عن النتروجين السائل في المواقع التالية: مركز معالجة الليشمانيا، ومخابر أبحاث الايكاردا في كلية الزراعة، وجهاز توليد غاز النتروجين الكائن في كلية العلوم، أهملت هذه الدراسة (تصنيع أيروجيل من أساس غضاري) وأهملت إمكانية تطبيقها لتكلفتها العالية أيضاً.

تم تحضير العينات في هذه الأطروحة وفق ثلاث مراحل:

3-2 المرحلة الأولى

تم السعي في هذه المرحلة من الأطروحة إلى تصنيع عينة aeroclay كما ذكر سابقاً، واستبدال دور النتروجين السائل والمجفدة في توليد البنية المسامية بإضافة مادة الايروزيل والسوربوسيل إلى الغضار (البيلون) للتوصل إلى قوام الجل (الهلامي) المميز للعينة العازلة. كانت العينات بعد الجفاف (والذي استغرق أكثر من خمسة عشر يوماً) كانت ذات مقاومة ميكانيكية ضعيفة للغاية، تم التوجه بعد ذلك إلى إجراء معالجة للغضار (البيلون) لتحسين خصائص العزل الحراري للغضار، إلا أن هذا الأمر استغرق وقتاً طويلاً حيث يتم غسل الغضار بالماء ثم يتم ترشيحه باستخدام أقماع فصل لتتم معالجته بعد ذلك للتخلص من المواد العضوية والشوائب الأخرى. اختصاراً للوقت وحيث أن هذا الأمر يتطلب تخصصاً في الكيمياء، مبتعدين عن الهدف الرئيسي وهو تصنيع مادة عازلة وإجراء الاختبارات اللازمة عليها، تم التوجه لتصنيع خرسانة خلوية باستخدام عامل توسع جديد (غير مسحوق الألمنيوم) وهو حمض الكبريت الذي يتفاعل مع مزيج الإسمنت والرمل وبوجود الغضار

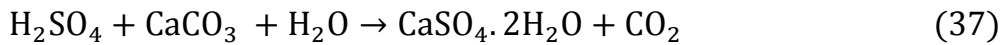
¹⁰ المونتموريولونيت: إحدى مركبات الغضار

¹¹ النتروجين السائل: هو النتروجين في الحالة السائلة عند درجة حرارة منخفضة للغاية، أول ظهور للنتروجين السائل كان في جامعة جاغيلونيان في 15 أبريل 1883 من قبل علماء فيزيائيين بولنديين. يستعمل النتروجين السائل في إعداد الثلجات والحفاظ على برودة الأجسام والمواد ويستخدم لعلاج بعض الأمراض الجلدية.

(البيلون) كمادة أولية متوفرة في السوق المحلية ليحل محل الرماد المتطاير والمكونات الإضافية الأخرى المستخدمة في تصنيع AAC.

تم طحن صخور الغضار الخام باستخدام مطحنة كرات في كلية العلوم (والتي تعمل على مبدأ احتكاك الكرات مع المادة المراد طحنها). يتم بعد الحصول على غضار خام وغير معالج النخل ضمن مناخل هزازة بأقطارٍ مختلفةٍ في مخبر الصناعات اللاعضوية في كلية العلوم، وقد استغرقت عملية طحن الغضار وقتاً طويلاً بسبب تعرضه للرطوبة حيث تعلق جزيئات الغضار الرطبة على الجدران الداخلية للمطحنة وعلى كرات الطحن وتعيق عملية الطحن فكان لابد من تجفيف الغضار إلى درجة حرارة لا تتجاوز 90°C (حرصاً على عدم تخريب البنية الشبكية للغضار) بالإضافة إلى غسل كرات الطحن وتجفيفها.

لقد تم تجفيف الغضار مرة أخرى قبل إجراء النخل لأن المناخل الناعمة تتأثر بالرطوبة الموجودة بالغضار مما يعيق مرور جزيئات الغضار من خلال المنخل. لقد استغرقت عمليتا الطحن والنخل ثلاثة شهور بسبب انقطاع التيار الكهربائي المستمر الذي كانت تعاني منه مدينة حلب والذي رافقه انقطاع في المياه. تم تحضير عينة إسمنتية غضارية من تفاعل المسحوق المؤلف من الإسمنت والرمل وكربونات الكالسيوم CaCO_3 والغضار مع حمض الكبريت (تم اختيار حمض الكبريت التجاري لانخفاض ثمنه نسبةً إلى حمض الكبريت النقي) والذي ينتج عنه غاز ثنائي أكسيد الكربون، ليرتفع ويحل محله الهواء مولداً مساماً وفق التفاعل التالي:



المواد الأولية:

- إسمنت بورتلاندي مطابق للمواصفة ASTM C150
 - رمل ناعم بنسبة 10%.
 - غضار (بيلون) بنسب متغيرة 15% و 20% و 25% و 30%
 - كربونات الكالسيوم: أضيفت كربونات الكالسيوم في بداية التحضير، وتم الاستغناء عنها لاحقاً، لتأثيرها السلبي على المقاومة الميكانيكية للعينات المحضرة نتيجة تفاعلها مع حمض الكبريت لتشكل كبريتات الكالسيوم.
 - حمض الكبريت التجاري: استخدم حمض الكبريت التجاري من مصادر متعددة، وتمت معايرة الحمض كأساس لتحديد تركيز الحمض المستخدم في كل مرة في مخابر الكيمياء التحليلية في كلية الصيدلة.
- كما أجريت عدة اختبارات لتحديد زمن تفاعل حمض الكبريت مع الغضار (البيلون) والإسمنت وسرعة التفاعل وحجم المسام المتشكلة (بعد انطلاق غاز ثنائي اوكسيد الكربون).

وضعت المكونات الجافة التي تم طحنها مسبقاً و الواردة أعلاه (المواد الأولية) ضمن حيز هوائي مغلق لتمتزج معاً بشكل متجانس. كما تم تحضير عدة محاليل من حمض الكبريت التجاري بتركيز مختلفة. كما تم تحديد حاجة المسحوق من المحلول الحمضي اللازم للتمليط فكانت حاجة 50 gr من المسحوق لا تتعدى 100 ml من المحلول الحمضي (مع العلم أن 50 gr من المسحوق لا تحتاج سوى لـ 100 ml ماء ليتم تمليطها). لكن المشكلة تكمن في أن الحمض يسرع من تصلب الملاط، نتيجة تفاعل الحمض مع المكونات الأخرى حيث يتشكل الجبس، مما يستدعي إضافة المزيد من الماء ليتم الحصول على ملاط¹² متجانس. وبعد تشكل الملاط، يسكب في القالب ثم يترك ليجف. لقد تم إضافة الجبس إلى الملاط للتسريع من عملية التصلب مما يساعد على انفصال العينة عن القالب أيضاً.

1-2-3 تحديد تركيز المحلول الحمضي

أدى استخدام المحلول الحمضي بتركيز مرتفعة إلى حدوث هشاشة في العينة. تنتج هذه الهشاشة عن ترسب الأملاح غير المنحلة نتيجة الزيادة غير المرغوب فيها من الحمض في المحلول (كبريتات المغنيزيوم والكالسيوم). فكان لا بد من تحديد كمية الحمض والماء التي يحتاجها الملاط، بحيث لا تتجاوز PH للملاط القيمة 7، منعاً لتشكيل الأملاح المنحلة فيه.

لقد تمت إضافة 7 ml ماء إلى 5 gr من الإسمنت البورتلاندي وبعد فترة وجيزة من الزمن قيست درجة القلوية PH للمحلول فكانت 14، أضيف بعدها الحمض إلى الإسمنت الممزوج بالماء لحين بلوغ القيمة $PH = 7$ ، تم قياس كمية الحمض المستهلكة فكانت 2.5 ml، علماً أن الإسمنت (وبشكل مشابه للغضار) يتأثر بالرطوبة لذلك يجب حفظه قدر الإمكان بمعزل عن الوسط الخارجي.

فُدرت كميات المياه والحمض اللازمة وفق الجدول (1-3) التالي:

جدول (1-3) كميات الماء والحمض التقريبية اللازم إضافتها لحين حدوث تعادل في الوسط

كمية الحمض (مل)	كمية الماء (مل)	الوزن (غ)	المادة	PH قبل إضافة الحمض
-	3.5	5غ	رمل	7
5	7	5غ	إسمنت	11
2.5	10	5غ	غضار	9
0.03	5	5غ	جبس	6
1	6	5غ	نحاعة	8

¹² الملاط: مادة بناء تستخدم لربط القرميد (الطوب) أو الحجر ولملء الفراغات بينها. الملاط بصورة عامة يصنع على شكل عجينة تصبح صلبة حين تجف وتتكون من مواد مختلفة مثل الطين أو الصلصال أو الإسمنت أو مزيج من هذه المواد وقد يضاف إليها الرمل.

تأثير المكونات الإضافية الأخرى

تبين بعد إجراء عدة تجارب أن إضافة مادة الجبس¹³ إلى العينة يؤدي إلى تشكل عصيات اسمنتية تلعب دور سلبي في عملية تصلب الاسمنت لذلك يمكن استخدامه بنسب صغيرة لا تتعدى %10، في حين أن وجود الرمل يزيد من كثافة العينة وبالتالي تنخفض معه المسامية المطلوبة، لذلك يمكن استخدامه أيضاً بنسب لا تتجاوز 15%.

تمت في مرحلة لاحقة إضافة الكمبرلان¹⁴ (Comperlan) كعامل مولد للرغوة لكن التفاعل أصبح سريعاً وأدى إلى حدوث انتفاخ غير مجدٍ للعينة وحال دون حدوث تصلب للعينة كما هو موضح بالشكل (1-3).



الشكل (1-3) الملاط بعد إضافة الكمبرلان

كما أضيف محلول كربونات الأمونيوم ليحدث تفاعل إضافي مع الغضار (البيلون) يؤدي إلى انطلاق غاز النشادر NH_3 إضافةً لغاز ثنائي أكسيد الكربون وهذا يعني الحصول على مزيد من الفقاعات (مسامية أكبر)، لكن المزيج لم يتفاعل بكامله مع الكربونات مما أدى إلى حدوث عدم تجانس في العينة بعد الصب كما هو موضح بالشكل (2-3).



الشكل (2-3) الملاط بعد إضافة كربونات الأمونيوم إليه

¹³ الجبس: من الخامات المتوفرة بكثرة في الأرض وهو كبريتات الكالسيوم اللامائية $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ويتواجد مع الدولوميت والطين والحجر الجيري وهو ذو لون رمادي أو أبيض، إن مخاطره كبيرة جداً في البناء حيث تتحد كبريتات الكالسيوم مع الإسمنت وبالتالي يصبح (البيتون المسلح) مع مرور الزمن هشاً جداً مما يؤدي إلى تصدع الأبنية لذلك يستحسن في عملية البناء تعويض الجبس بالإسمنت المقاوم للكبريتات إذا كانت نسبة الجبس (%6 أو أقل) أما إذا كانت نسبته (أكثر من %6) ننصح باستبداله بالتربة مع استعمال إسمنت مقاوم أيضاً.

14 الكمبرلان: المادة فعالة شارديية سالبة الشحنة، ترفع اللزوجة وتثبت الرغوة وتستخدم في صناعة المنظفات.

استغرق تحضير العينات الناتجة عن تفاعل حمض الكبريت مع الغضار والإسمنت أكثر من عام، ليتبين أن هذه التجارب غير مجدية إذ لم يتم التوصل إلى عينة خرسانية متماسكة يمكن القبول بها كمادة عازلة أو كمادة تستخدم في البناء. كما بينت لنا أيضاً الدراسة المرجعية الضرر الذي يحدثه جذر الكبريتات على الخرسانة أو على العينة التي يدخل في تركيبها الإسمنت [11]، (حيث لا يمكن أن تتجاوز نسبة جذر الكبريتات 5% من الخرسانة)، لا سيما إذا كانت مياه الجبل المستخدمة مياهاً كبريتيةً [12] أو لدى تعرض العينة لتيار هوائي مكشوف برطوبة عالية مصحوبة بغاز الكبريت [30]. تم التوجه بعد ذلك إلى تصنيع عينة إسمنتية خلوية عازلة باستخدام عامل توسع للإسمنت هو مسحوق الألمنيوم، مع إضافة بعض الخامات مثل الغضار بدلاً من الرماد المتطاير إلى المكونات الصلبة للعينة. تم استخدام مسحوق الألمنيوم (في إحدى مراحل التحضير) من مخلفات تصنيع واجهات الألمنيوم، ولما كانت هذه المخلفات محاطة بطبقة من أكسيد الألمنيوم بسبب تعرضها للرطوبة والهواء الخارجي، كان لا بد من إزالة هذه الطبقة بإضافة هيدروكسيد الصوديوم إلى مسحوق الألمنيوم بحيث يكون تركيز الهيدروكسيد (1N).

لقد تبين عندها أن الغضار يؤثر سلباً على تماسك العينة فهو ينتفخ بوجود الماء لا سيما إذا تمت إضافته إلى المزيج دون معالجة أو دون وجود مادة رابطة (بوليمير على سبيل المثال)، فإن العينات التي يدخل في تركيبها الغضار ولو بنسبة بسيطة (10%) عانت من التشقق بشكل دائم، بالرغم من تفاعل الغضار (البيلون) بصورة جيدة مع باقي مكونات المزيج بوجود مسحوق الألمنيوم وتم تحقيق مسامية ملائمة. تم الاستغناء عن الغضار كمكون رئيسي أو ثانوي في المزيج، بعد مسيرة بحثية طويلة، وتم الاستغناء عن الرمل أيضاً حيث تزداد معه كثافة العينة دون تحقيق العزل الحراري المطلوب.

3-2-2 الاختيار المناسب للقالب

بدايةً تمت عملية الصب (في مرحلة التحضير باستخدام حمض الكبريت) ضمن قوالب معدنية غير مقاومة للحموض، واستبدلت بقوالب بلاستيكية مقاومة للأحماض وتحتمل درجات حرارة تصل حتى 700°C (حيث ترتفع درجة حرارة الملاط بشكل كبير بعد إضافة حمض الكبريت). استخدمت أيضاً قوالب مصنعة من فولاذ غير قابل للصدأ (Stainless Steel) وبعد الصب تترك العينة لتجف لعدة أيام، وبعد الجفاف تتم إزالة العينة من القالب.

استخدم زيت الزيتون ثم زيت البارافين في دهن القالب قبل الصب ليسهل من عملية إزالة العينة من القالب، لكنها كانت تمتزج مع الملاط الإسمنتي ولا تساهم في الانفصال عن الجدار الداخلي للقالب، كما تم دهن القالب بالشمع المائي وهو مادة تستخدم في تصنيع المنظفات بهدف تشكيل طبقة تفصل الملاط عن القالب، كما

استخدم الزيت السيليكوني لنفس الغرض، وعلى الرغم من كل تلك المحاولات لم تتفصل بعض العينات عن القالب، مما أدى إلى انهيارها.

أخيراً تم تصميم قالب من الكروم بأبعاد (14.5×14.5) cm (بما يتلاءم مع الأبعاد المحددة لجهاز اختبار الإيصالية الحرارية، على شكل إطار خارجي وقاعدة سفلية منفصلة، يفتح هذا الإطار ويغلق بسهولة مما يؤمن إزالة العينة من القالب كما هو موضح بالشكل (3-3)).



الشكل (3-3) القالب المصمم لصب العينات

3-3 المرحلة الثانية

تم تحضير سلسلتين من عينات إسمنتية وفق أبعاد ثلاث الاختبارات التي ستخضع لها (من إيصالية حرارية ومقاومة ميكانيكية على الضغط...) وهذا التحضير تم وفق ASTM-C-1693

1- المواد الأولية:

- إسمنت بورتلاندي مطابق للمواصفة ASTM C150
- الكلس الحي (أوكسيد الكالسيوم CaO)
- مسحوق ألمنيوم (مخلفات من ورش تصنيع إطارات الألمنيوم للنوافذ الزجاجية)
- محلول هيدروكسيد الصوديوم NaOH بتركيز 1N
- ملح كلوريد الصوديوم

التركيب الكيميائي الأول A

النسبة المئوية (%)	المادة
84	الإسمنت البورتلاندي
15	أوكسيد الكالسيوم
1	الألمنيوم

التركيب الكيميائي الثاني B

النسبة المئوية (%)	المادة
99	الإسمنت البورتلاندي
1	الألمنيوم

التركيب الكيميائي الثالث C

النسبة المئوية (%)	المادة
89	الإسمنت البورتلاندي
10	كلوريد الصوديوم (NaCl)
1	الألمنيوم

إن المكونات الصلبة والتي ذكرت سابقاً هي مطابقة للمواصفة ASTM C1693-09 (مواصفة الخرسانة الخلوية AAC) هذا وقد تم وزن المكونات باستخدام ميزان تحليلي حساس من نوع Denver Instrument نموذج AA-200 حساسيته 0.1mg.

تم تحديد الوزن الإجمالي للعينة ليكون 150 gr وبعد مزج المكونات الصلبة جيداً ضمن حيز هوائي مغلق (لضمان تجانس المزج) أضيف الماء بالتدرج لحين الحصول على الملاط (عجينة الإسمنت) مع المزج اليدوي المستمر كما هو موضح بالشكل (3-4) ويحدود 100 ml ماء وبعد حدوث التفاعل ينطلق الغاز محدثاً الفراغات الهوائية وفق المعادلات التي وردت سابقاً في الدراسات المرجعية.



الشكل (3-4) المزج اليدوي للعينات

تم صب العينة ضمن قالب بالاهتزاز¹⁵ لضمان استمرارية التفاعل (تحقيق توزيع متجانس لمسحوق الألمنيوم ضمن الملاط) والحصول على قاعدتين مستويتين للعينة. بعد ذلك تترك العينات لتجف مع إضافة الماء بشكل مستمر لاتمام تفاعل الإماهة وتصلب العينة لمدة 7 أيام تقريباً. وضعت بعدها العينات في فرن بدرجة حرارة لا تتجاوز 105 °C ولمدة 6 ساعات تقريباً وأضيف (من أجل السلسلة الأولى للعينات) القليل فقط من محلول هيدروكسيد الصوديوم (NaOH) بتركيز 1N إلى سطح العينة العلوي وتم ذلك بالتدرج أثناء الصب بالاهتزاز لأن إضافة هيدروكسيد الصوديوم يحفز التفاعل ويمنح العينة الناتجة مقاومة ميكانيكية إضافية.

3-4 المرحلة الثالثة

لقد تبين وفق الدراسة المرجعية أنه يجب ألا تتجاوز نسبة مسحوق الألمنيوم المضاف عن 0.5% وحيث أن مسحوق الألمنيوم الذي تمت إضافته للعينات في المرحلة الثانية هو مخلفات (أي أنه لا يحتوي بالضرورة على ألمنيوم نقي) لذلك وصلت النسبة إلى 1%.

أما في هذه المرحلة فقد استخدم مسحوق ألمنيوم ناعم جداً ونقي فلم تتجاوز نسبة مسحوق الألمنيوم في المكونات الجافة عن 0.5%، حيث تقود زيادة مسحوق الألمنيوم إلى عينات أقل صلابةً. كما تمت إضافة أكسيد الكالسيوم في هذه المرحلة للرفع من قيمة المقاومة الميكانيكية للعينات، مع إضافة ملح كلوريد الصوديوم لتخفيض الإحصالية الحرارية من خلال حساب تشكيل مسام إضافية.

وبالتالي تم تحضير ثلاثة عينات إسمنتية إضافية (إسمنت + مسحوق الألمنيوم + كلوريد الصوديوم + كربونات الكالسيوم) مع تغيير نسب الملح المضاف بهدف دراسة تأثير نسبة الملح على الإحصالية الحرارية والضغط (المقاومة الميكانيكية).

التركيب الكيميائي الرابع

النسبة المئوية (%)	المادة
79.5	الإسمنت البورتلاندي
15	كربونات الكالسيوم
5	كلوريد الصوديوم
0.5	الألمنيوم

¹⁵ الصب بالاهتزاز: وضعت العينة في قالب وتم تثبيتها على قاعدة المناخل الهزاة المستخدمة لاحقاً في القسم العملي.

التركيب الكيميائي الخامس

النسبة المئوية (%)	المادة
74.5	الإسمنت البورتلاندي
15	كربونات الكالسيوم
10	كلوريد الصوديوم
0.5	الألمنيوم

التركيب الكيميائي السادس

النسبة المئوية (%)	المادة
69.5	الإسمنت البورتلاندي
15	كربونات الكالسيوم
15	كلوريد الصوديوم
0.5	الألمنيوم

5-3 الاختبارات المنفذة على العينات:

1-5-3 اختبار المسامية - الكثافة الظاهرية - امتصاص الماء:

يتطلب تحديد المسامية استخدام أحد أهم أجهزة قياس المسامية (MIP)¹⁶ [53] ولصعوبة الحصول على هذا الجهاز حددت هذه الخصائص وفقاً للمواصفة ASTM-C20-00 وذلك بتحديد القيم التالية:

- الوزن الجاف للعينات **D**: يتم وزن العينة بميزان حساس وهي جافة بوحدة [g].
- الوزن المعلق **S**: توضع العينة في الماء ويتم غليها وهي مغمورة في الماء لمدة ساعتين تحت الضغط الجوي. تُبرّد بعد ذلك العينة حتى درجة حرارة الغرفة، يجب أن تبقى العينة بعد الغليان مغمورة بالماء بشكل كامل ولمدة 12h. يُربط سلك نحاسي بأحد أذرع ميزان حساس ويُغمر السلك بالماء ويشكل على هيئة حلقة ويصفر الميزان. توضع العينة المشبعة بالماء على حلقة السلك بشرط أن تكون مغمورة بشكل كامل وبعدها يحدد الوزن **S** كما هو موضح بالشكل (3-5).

¹⁶ MIP: Mercury Intrusion Porosimetry Theory ويعتمد مبدأ هذا الجهاز على نفاذ الزئبق ضمن العينات المسامية لتحديد

حجم الفراغات ضمن المادة نسبة إلى المادة الصلبة الأصل.



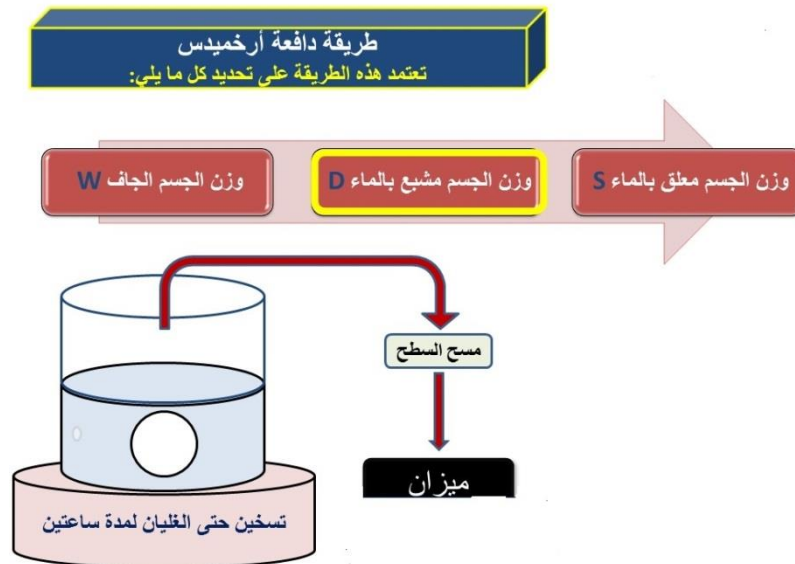
الشكل (5-3) قياس المسامية حيث علقت العينة بالشريط الأحمر المرتبط بذراع الميزان

السفلي

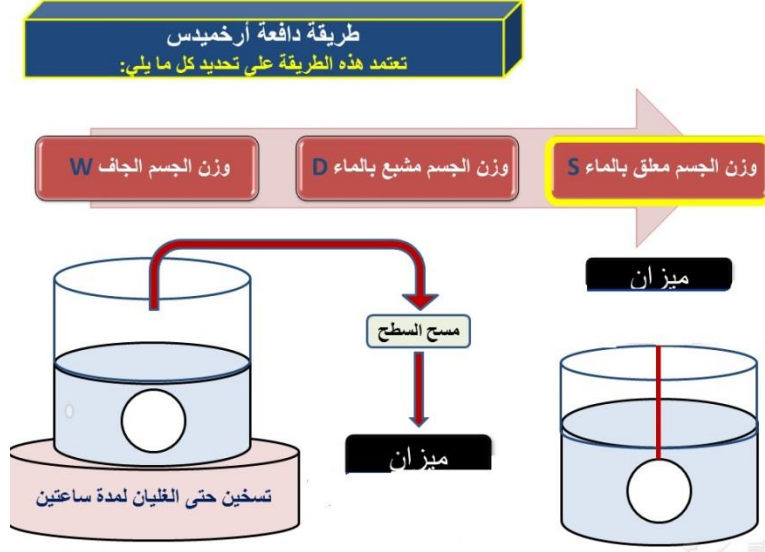
- الوزن المشبع W : نقوم بعد تحديد الوزن المعلق بمسح العينة بواسطة قطعة قماش قطنية مبللة بالماء وذلك لإزالة قطرات الماء الموجودة على السطح ثم نحدد الوزن W مقدراً بوحدة [g].
- الحجم V : يساوي حاصل طرح الوزن المعلق من الوزن المشبع مقدراً بوحدة [cm³].

$$V = W - S \quad (44)$$

(مع العلم أن 1g يساوي 1cm³ وذلك عند درجة حرارة الغرفة)



الشكل (6-3) وزن الجسم المشبع بالماء



الشكل (3-7) وزن الجسم المعلق بالماء

المسامية الظاهرية % ϕ :

$$\phi = \frac{(W - D)}{V} * 100 \quad (38)$$

نسبة الماء الممتص **A**:

$$A = \frac{(W - D)}{D} * 100 \quad (39)$$

الكثافة الظاهرية ρ :

$$\rho \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{D}{V} \quad (40)$$

الوزن النوعي الظاهري **T**:

$$T = \frac{D}{(D - S)} \quad (41)$$

2-5-3 اختبار الإيصالية الحرارية

- جرى اختبار الإيصالية الحرارية في كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب وفق المواصفة ASTM C177 باستخدام جهاز قياس معامل التوصيل الحراري بتقنية المربع الساخن كما هو موضح بالشكل (3-8)، والذي يتألف من:

- صندوق معزول عن الوسط الخارجي بشكل مربع طول ضلعه $(14.5 \pm 0.5) \text{ cm}$ ، وفي قاع الصندوق حجرة سفلية تضم سخان كهربائي يقوم بتسخين السطح السفلي للعينة المدروسة.
 - مجسین لقياس درجتي حرارة سطحي العينة العلوي والسفلي، يتصل المجسان بشاشتي إظهار لدرجة الحرارة ودقة المقاييس $\pm 0.1^\circ \text{C}$ ، بحيث تكون المسافة الفاصلة بين المجسین 1 cm تقريباً (سماكة العينة نفسها وسماكة الصندوق المعزول)
 - نظام التغذية الكهربائي للسخان قابل للضبط يتغير بين القيم (2,4,6,8 V)
 - مقياس شدة التيار الكهربائي (I) بدقة قياس $\pm 0.1 \text{ A}$
 - مقياس جهد التيار الكهربائي (V) بدقة قياس $\pm 0.05 \text{ V}$
- يُضبط جهاز اظهار درجات الحرارة على القيمة $200^\circ \text{C} \leq$ ، عند التغذية بالتيار الكهربائي يبدأ السخان الكهربائي بالعمل وترتفع درجة حرارة السطح السفلي للعينة وتتخذ درجتي الحرارة على السطحين العلوي والسفلي منذ لحظة بداية الاختبار $t=0$ حتى الوصول إلى الحالة المستقرة وذلك بثبات الفرق بين درجتي الحرارة العلوية والسفلية ويستغرق هذا الأمر مدة زمنية تتراوح من 45-60 min.



المقاومات الحرارية المطبقة للتسخين في الصندوق المعزول



شاشتا عرض درجتي الحرارة العلوية والسفلية



جهاز التغذية الكهربائي مع أجهزة قياس جهد وشدة التيار الكهربائي

الشكل (3-8) أجزاء جهاز تحديد الإيصالية الحرارية في مخبر الفيزياء في كلية الهندسة الميكانيكية

وبحساب الفارق بين T_1 و T_2 واللذان تمثلان درجتى الحرارة العلوية والسفلية، أبعاد العينة والسيالة الحرارية المتدفقة في الحيز، يمكن الحصول على معامل الانتقال الحراري من العلاقة:

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (42)$$

حيث أن Q التدفق الحراري ويقدر ب [W]

ΔT هو الفارق بين درجتى حرارة سطح العينتين ويقدر ب [K]

k معامل الانتقال الحراري ويقدر ب $\left[\frac{W}{m.K}\right]$

A مساحة سطح العينة وتقدر ب $[m^2]$

L سماكة العينة وتقدر ب $[m]$

وبحسب التدفق الحراري باستخدام العلاقة:

$$Q = V \cdot I \quad (43)$$

V جهد التغذية ويقدر ب [V]

I شدة التيار المطبقة وتقدر ب [A]

أجريت معايرة لجهاز قياس معامل التوصيل الحراري بشكل مسبق من قبل الباحث أنس قرمو، بغية التأكد من دقة نتائج الجهاز، تمت المعايرة باستخدام ثلاث عينات قياسية من المواد العازلة التجارية ذات معامل توصيل حراري معلوم هي بولي سترين، الستيريور وبولي اتلين وتم قياس معامل التوصيل الحراري لهذه العينات القياسية تجريبياً باستخدام جهاز الاختبار (مخبر الفيزياء - كلية الهندسة الميكانيكية) ورتبت النتائج في الجدول التالي:

جدول (4-5) نتائج معايرة جهاز قياس معامل التوصيل الحراري [8]

معامل التوصيل الحراري الاسمي $\left(\frac{W}{m.K}\right)$	معامل التوصيل الحراري النتائج $\left(\frac{W}{m.K}\right)$	ΔT	$Q(W)$	$A(m^2)$	$L \times 10^{-2}(m)$	العينة
0.036	0.036924	63.7	8.8	0.0219	0.56	بولي سترين
0.037	0.038214	64.2	8.8	0.0225	0.06	ستيريور
0.042	0.044238	64.7	8.8	0.0225	0.07	بولي اتلين

3-5-3 اختبار العزل الصوتي

الصوت هو عبارة عن اهتزازات لوسط مرن تدركها أعضاؤنا السمعية أو أجهزة الإستقبال الصوتية. الإدراك الفيزيولوجي للصوت ليس الا انعكاس للخصائص الفيزيائية الموافقة له.

وينتشر الصوت في الهواء بسرعة $V = (331 + 0.6T)\left[\frac{m}{sec}\right]$ حيث تشير T إلى درجة حرارة الوسط المحيط، حيث تبلغ سرعة الصوت في الهواء $331 m/sec$ عند درجة حرارة $(0^\circ C)$ في حين أنها تبلغ

343 m/sec عند درجة حرارة (20°C) وينتشر الصوت بتردد يشير إلى عدد الذبذبات التي يولدها الجسم المتذبذب (المهتز) في واحدة الزمن، ويستطيع الإنسان سماع الأصوات التي يقع ترددها في المجال من (20 – 20000) Hz. [56]

• تقاس شدة الصوت (E) بالطاقة المنتشرة عبر واحدة السطح العمودية على جهة انتشار الموجة وتقدر في الجملة الدولية بوحدة W/m^2 . تم اختبار العزل الصوتي في مخبر الفيزياء - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة حلب وفق المواصفة ISO 10534-1 من خلال قياس الطاقة بين المرسل والمستقبل بإرسال موجة صوتية وفق تردد معين (3000 kHz).

توضع العينة أمام المستقبل وتقاس الطاقة بعد اختراقها للعينة، كما هو موضح بالشكل (3-9) باستخدام راسم اهتزاز مهبطي مزدوج الحزمة ومولد اهتزازات كهربائية (1-10kHz) مع مضخم كربوني لإرسال الأمواج الصوتية وميكروفون لاستقبال الأمواج الصوتية وقاعدة معدنية يثبت عليها المضخم والميكروفون مع جسر لينزلق عليه المضخم والميكروفون.



الشكل (3-9) اختبار العزل الصوتي

بمعرفة طاقة الموجة قبل وضع العينة وبعدها يمكن حساب معامل امتصاص الصوت μ من العلاقة:

$$E = E_0 \cdot e^{-\mu X} \quad (44)$$

X: سماكة العينة وتقدر بـ [cm]

α : معامل امتصاص الصوت ويقدر بـ $[cm^{-1}]$

E: طاقة الموجة الممتصة وفي هذا الاختبار تقدر بـ [V]

E_0 : طاقة الموجة العابرة الكلية وفي هذا الاختبار تقدر بـ [V]

تمت معايرة الجهاز وفق ASTM E1012 لحدوث تطابق بين موجتي الارسال والاستقبال بقياس البعد بين المرسل والمستقبل ليسجل في المرة الأولى $\lambda_1 = 28 \text{ cm}$ ، وفي المرة الثانية $\lambda_2 = 16 \text{ cm}$ ، لنحصل على علاقة حساب سرعة الصوت في الهواء: [56]

$$v = f * \lambda \quad (46)$$

حيث أن v هي سرعة انتشار الصوت في الهواء وتقدر بـ (m/sec) f هو التردد المطبق وفي هذا الاختبار 3000 kHz ونحصل على تردد فعلي 2775 kHz بسبب الانزياح.

λ هو البعد المقاس ويقدر بـ m ويحسب من $(\lambda_1 - \lambda_2)$. [56]

$$v = 2775 * 0.12 = 333 \text{ m/sec}$$

وتحسب الأخطاء الناتجة عن القياس بالشكل:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2}$$

$$\Delta \lambda_1 = 0.01m, \quad \Delta \lambda_2 = 0.01m$$

$$\frac{\Delta v}{v} = 0.098$$

$$\Delta v = (333 \pm 32.634) \text{ m/sec}$$

3-5-4 اختبار المقاومة الميكانيكية

خضعت العينات الثلاثة لاختبار مقاومة الضغط باستخدام جهاز اختبار الضغط من شركة CHUN-YEN من النوع المسنني في مخبر خواص المواد في كلية الهندسة الميكانيكية- جامعة حلب، الحمولة العظمى للجهاز 200KN وسرعة التقدم العظمى 500 mm/min.

تم تطبيق حمولة ضغط محورية على العينات بما يتوافق مع المواصفة ASTM-E-1012 بواسطة فك علوي متحرك يضغط على العينة من الأعلى مع وجود فك سفلي ثابت كما هو موضح بالشكل (3-10). لقد تم ضبط سرعة التقدم لتكون 2mm/min [57]

تتم متابعة تقدم الاختبار من خلال مخطط بياني يظهر على شاشة الحاسوب يبين تزايد قوة الضغط مع الانفعال كما يمكن الحصول على بيانات الاختبار بجدول EXCEL. يمكن ضبط إعدادات الجهاز بحيث يتم إدخال أبعاد العينة والوحدات المستخدمة لإظهار ودراسة النتائج بالتفصيل.



الشكل (3-10) اختبار المقاومة الميكانيكية على الضغط

وهذا يخضع لقانون الإجهاد:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (45)$$

σ تمثل الإجهاد على الضغط (المقاومة الميكانيكية) وتقدر بـ $[N/m^2]$

F تمثل القوة الميكانيكية المطبقة وتقدر بـ $[N]$

A تمثل مساحة المقطع الذي تطبق عليه القوة وتقدر بـ $[m^2]$

الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

1-4 مقدمة

نستعرض في هذا الفصل نتائج الاختبارات التي أجريت على العينات المحضرة في المراحل الثلاثة، ثم نتطرق إلى نتائج الدراسة التحليلية بشكل مفصل، لنصل في الفصل القادم إلى أهم الاستنتاجات والتوصيات في سياق هذه الأطروحة. استغرقت محاولات التصنيع التي تمت في المرحلة الأولى مدة زمنية تجاوزت العامين وبسبب غياب النتائج المرجوة من العينات المصنعة في المرحلة الأولى، فإننا ننتقل مباشرة إلى المرحلة الثانية لنستعرض فيها نتائج اختبار العينات.

2-4 نتائج اختبارات المرحلة الثانية

أجريت الاختبارات على سلسلتين¹⁷ من العينات: وفق تركيب كيميائي أول A (84% إسمنت بورتلاندي، 15% كربونات الكالسيوم، 1% مسحوق الألمنيوم للينة الأولى)، وفق تركيب كيميائي ثاني B (99% إسمنت بورتلاندي، 1% مسحوق الألمنيوم للينة الثانية)، أخيراً وفق تركيب كيميائي ثالث C (89% إسمنت بورتلاندي، 10% كلوريد الصوديوم، 1% مسحوق الألمنيوم للينة الثالثة).

اختبار الكثافة الظاهرية

تم تحديد الوزن الجاف والمعلق والمشبع للسلسلتين الأولى والثانية ثم تم حساب المتوسط الحسابي للقراءتين وهذا موضح في الجداول (1-4) و(2-4) و(3-4) و(4-4) التالية:

جدول (1-4): الوزن الجاف والمعلق والمشبع للعينات - للسلسلة الأولى والثانية

رقم العينة	الوزن الجاف D (g)	الوزن المعلق S (g)	الوزن المشبع W (g)	رقم العينة	الوزن الجاف D (g)	الوزن المعلق S (g)	الوزن المشبع W (g)
A1	16	5.46	18.37	A2	14.65	5.06	18.005
B1	14.007	7.81	32.14	B2	14.82	5.76	30.49
C1	21.33	6.07	32.9	C2	20.92	6.34	30.88

¹⁷ يتم تحضير عينيتين من نفس التركيب الكيميائي في كل سلسلة.

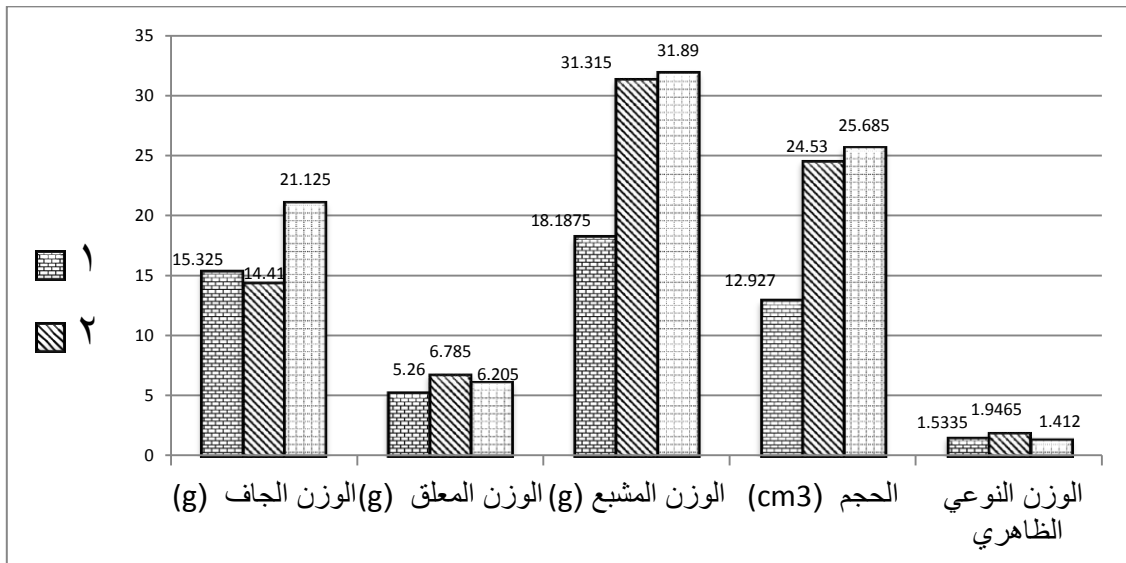
جدول (2-4) نتائج المسامية ونسبة الماء الممتص لعينات السلسلة الأولى

العينة	المسامية الظاهرية % ϕ	الحجم V (cm^3)	الكثافة الظاهرية ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$) ρ	الوزن النوعي الظاهري T	نسبة الماء الممتص A
A1	18.3	12.91	1239	1.54	14.8
B1	74.5	24.33	575	2.26	129.45
C1	43.1	26.83	795	1.39	54.2

جدول (3-4) نتائج المسامية ونسبة الماء الممتص لعينات السلسلة الثانية

العينة	المسامية الظاهرية % ϕ	الحجم V (cm^3)	الكثافة الظاهرية ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$) ρ	الوزن النوعي الظاهري T	نسبة الماء الممتص A
A2	25.9	12.945	1131.7	1.527	22.9
B2	63.3	24.73	599.2	1.633	105.7
C2	40.5	24.54	852.4	1.434	47.6

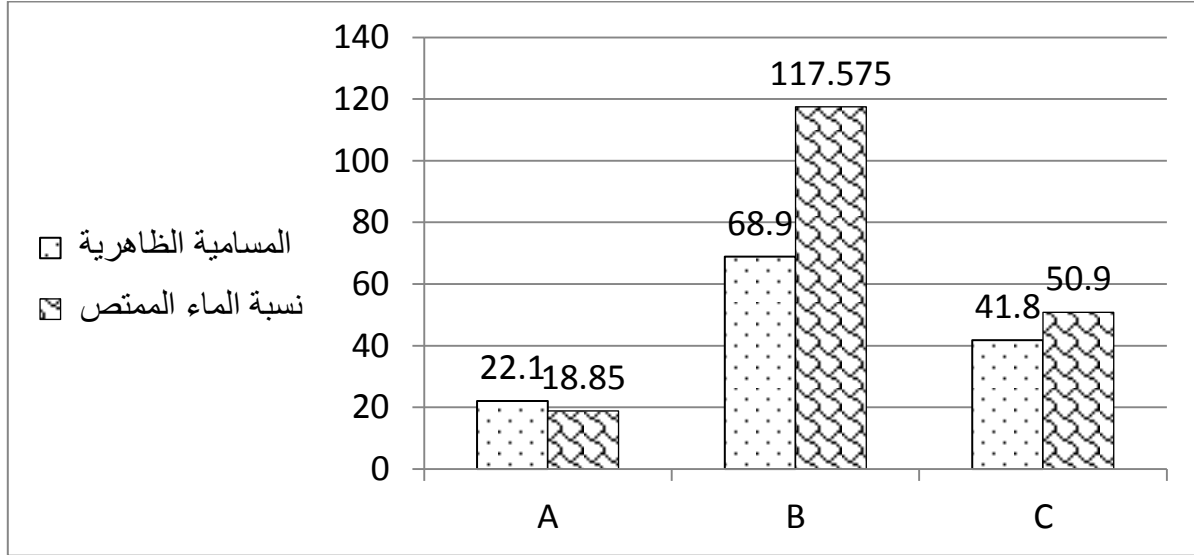
وبإدراج القيم الوسطية وفق المخطط الموضح بالشكل (1-4) نلاحظ أنه: سجلت B أعلى قيمة للمسامية وهذا يفسر بتفاعل مسحوق الألمنيوم مع الاسمنت بشكل كامل، وسجلت A أدنى قيمة للمسامية مع ارتفاع الكثافة الظاهرية ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$) 1185.35 كما هو موضح بالشكل (2-4)، دون أن تؤثر كثافتها الظاهرية المرتفعة على الحمولة الإجمالية للمبنى حسب المواصفة القياسية السورية للعزل الحراري (كود العزل السوري)، فيما حققت C قيمةً وسطية بين العينتين A وB.



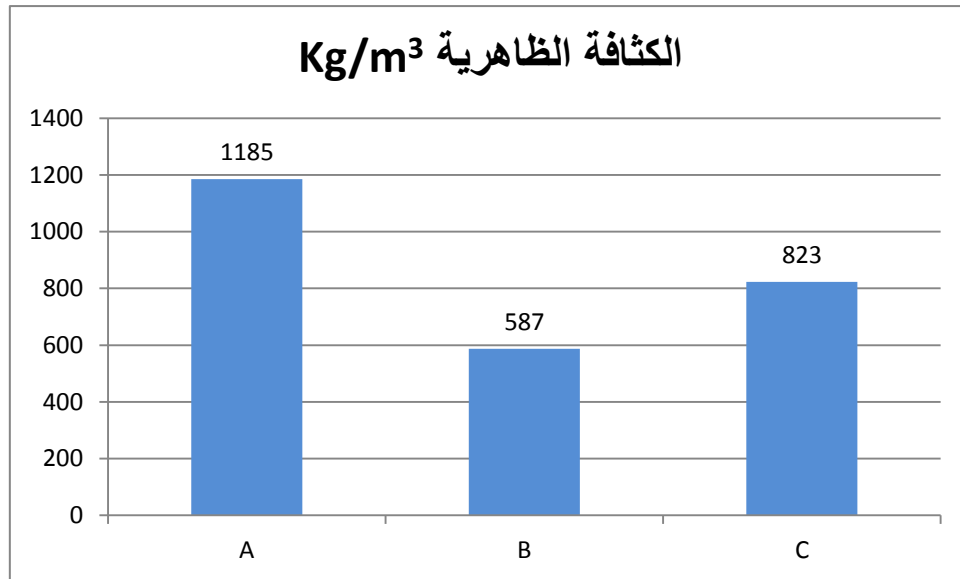
الشكل (1-4) الوزن الجاف والمعلق والمشبع والحجم والوزن النوعي الظاهري للعينات

أما فيما يتعلق بامتصاص الماء (كما هو موضح في الشكل (2-4)): نلاحظ أن B التي وصلت مساميتها إلى 68.9% (أعلى نسبة مسامية حيث تشغل الفراغات الهوائية معظم حجمها) سجلت أعلى قيمة لنسبة امتصاص الماء 117.575% وهذا يعني امتصاص كبير للرطوبة وهذا يسيء إلى مواصفاتها كمادة عازلة.

بينما سجلت A أخفض قيمة لنسبة امتصاص الماء (بسبب مساميتها المنخفضة) وبالتالي امتصاص أقل للماء 18.85% وهذا يعني الحصول على مادة عازلة للحرارة ولا تمتص الرطوبة بشكل كبير، ولقد سجلت C نتائج وسطية بين العينتين.

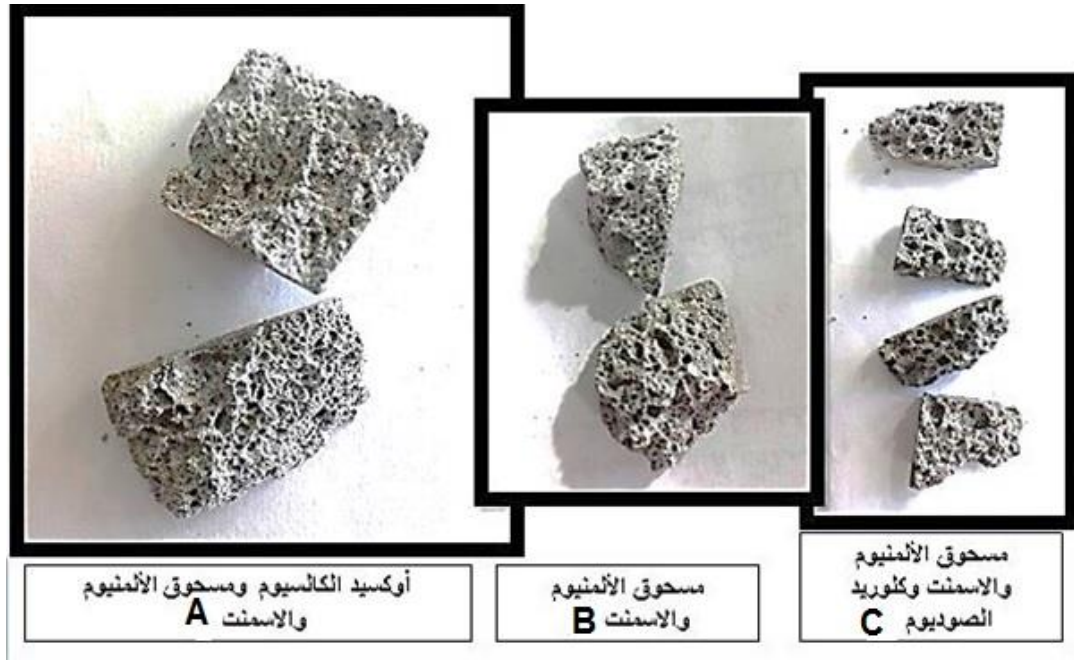


الشكل (4-2): المسامية الظاهرية ونسبة الماء الممتص



الشكل (4-3): الكثافة الظاهرية للعينات الثلاث

والشكل (4-4) يوضح أشكال البنية المسامية لبعض العينات المحضرة، فمن الملاحظ أن A تمتلك مسامية منخفضة متوزعة بشكل منتظم ولا تختلف أشكال المسام فيها بشكل كبير، بينما امتازت B بمساميتها العالية وانتظام توزع المسام مع اختلاف صغير في أشكالها، أما C فلقد امتازت بمسامية عالية نسبياً مع عدم انتظام في أشكال المسام، وعدم انتظام في توزيعها، إذ نلاحظ التحام بعض المسام ببعضها البعض.



الشكل (4-4) أشكال البنية المسامية للعينات الثلاث

اختبارات الإصالية الحرارية

يتحدد الخطأ المرتكب في قياس معامل التوصيل الحراري وفق العلاقة التالية:

$$P = V \times I = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} = k \cdot A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2}$$

$$\Delta V = 0.025 \text{ Volt}$$

$$\Delta T_2 = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta T_1 = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}, \Delta X = 0.5 \text{ mm}, \Delta I = 0.025 \text{ A}$$

وبالتالي يتحدد معامل التوصيل الحراري مع احتساب الخطأ المرتكب وفقاً للجدول التالي (4-6) والذي يبين أبعاد العينة وفرق درجات الحرارة ومعامل التوصيل الحراري (تضبط شدة التيار لتكون $I = 1.1 \text{ A}$ ولتكون $V = 8 \text{ Volt}$).

جدول (4-6) معامل التوصيل الحراري للعينات المحضرة في السلسلة الأولى

Q (W)	$A \times 10^{-4}(\text{m}^2)$	L $\times 10^{-2}(\text{m})$	ΔT	$k \pm \Delta k$ $\frac{W}{(m \cdot K)}$	العينة
8.8	$(14.8)^2$	1	24	0.167 ± 0.0164	A1
8.8	$(13.4)^2$	1.25	37.3	0.163 ± 0.0131	B1
8.8	$(14.5)^2$	1.1	31.7	0.145 ± 0.01241	C1

أما في السلسلة الثانية (حيث تضبط شدة التيار لتكون $I = 1.4 A$ ولتكون $V = 8.2 Volt$) فيكون معامل التوصيل الحراري وفق الجدول التالي:

جدول (7-4) معامل التوصيل الحراري للعينات المحضرة في السلسلة الثانية

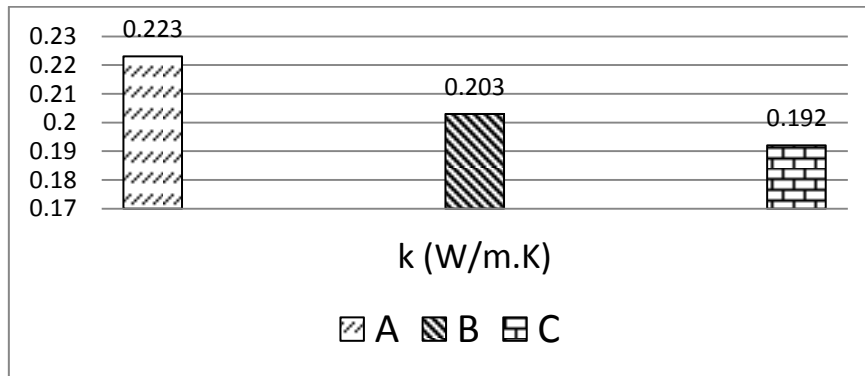
Q (W)	$A \times 10^{-4} (m^2)$	$L \times 10^{-2} (m)$	ΔT	$k \pm \Delta k$ $(\frac{W}{m.K})$	العينة
11.48	$(13.45)^2$	1.1	25	0.279 ± 0.0164	A2
11.48	$(14.3)^2$	1.3	30	0.243 ± 0.0131	B2
11.48	$(14.2)^2$	1.1	26	0.240 ± 0.01241	C2

ليكون معامل التوصيل الحراري الوسطي لسلاسل العينات المحضرة:

جدول (8-4) معامل التوصيل الحراري الوسطي للعينات المحضرة

العينة	$k(\frac{W}{m.K})$
A	0.223
B	0.203
C	0.192

نلاحظ بداية من الشكل (4-5) والذي يوضح تغير الإيصالية الحرارية للعينات أن أكبر قيمة للإيصالية الحرارية كانت من نصيب A والتي سجلت $0.22 (\frac{W}{m.K})$ هذا يعني أنها الأقل عزلاً (نسبةً للعينتين B و C) وهذه العينة تتألف من مزيج الألمنيوم والإسمنت مع أكسيد الكالسيوم، يعزى ذلك إلى انخفاض مسامية العينة بشكل كبير نسبةً إلى العينتين B و C



الشكل (4-5) معامل التوصيل الحراري k للعينات الثلاث

سجلت C أدنى قيمة للإيصالية الحرارية $(\frac{W}{m.K}) 0.192$ ، ويجدر التنويه إلى أن هذه العينة تم تحضيرها من مسحوق الألمنيوم والإسمنت وكلوريد الصوديوم وإضافة الأخير يقود إلى مسامية إضافية بعد المزج، ولاحقاً بعد الصب تغسل العينة بالماء لتتم إزالة كلوريد الصوديوم، حيث تؤثر الأملاح المنحلة بشكل سلبي على العينة، وسجلت B قيمة وسطية $(\frac{W}{m.K}) 0.203$ للإيصالية الحرارية، وهي مصنعة من مسحوق الألمنيوم والإسمنت فقط.



الشكل (4-6) جهاز اختبار معامل امتصاص الصوت



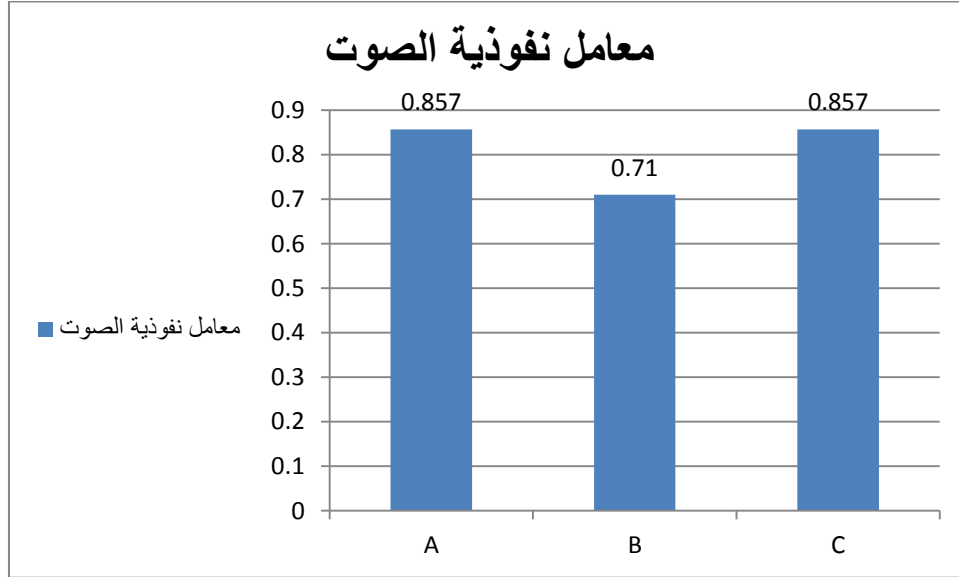
الشكل (4-7) جهاز التغذية الكهربائي الخاص باختبار معامل امتصاص الصوت

بمعرفة طاقة الموجة قبل وضع العينة وبعدها (أي بعد امتصاص العينة لطاقة الموجة) وذلك بعد إجراء معايرة الجهاز يمكن حساب معامل امتصاص الصوت α كما أوضحنا مسبقاً ليتم الحصول على النتائج الموضحة بالجدول (4-9):

جدول (4-9) نتائج معامل امتصاص الصوت للعينات

معامل نفوذية الصوت μ	طاقة الموجة الممتصة E (v)	طاقة الموجة الكلية E_0 (v)	التردد f (kHz)	سمائة العينة X (cm)	مساحة المقطع A (cm^2)	رقم العينة
0.857	1.2	1.4	3000	0.9	0.6×0.6	A
0.71	1	1.4	3000	1.25	0.6×0.6	B
0.857	1.2	1.4	3000	1.1	0.6×0.6	C

يفسر الجدول السابق انخفاض قيمة معامل نفوذية الصوت للعينة B (0.71 cm^{-1}) بارتفاع مسامية العينة والتي يشغل الهواء معظم حجمها، في حين يرتفع معامل نفوذية الصوت للعينتين المتبقيتين، وتستخدم العينة B كعازل صوتي جيد في أعمال البناء وهذا يترجم بالشكل (8-4).



الشكل (8-4) معامل نفوذية الصوت

يوضح الجدول التالي (10-4) أهم المواد المستخدمة في العزل الصوتي ومعامل الامتصاص الصوتي لها ودمجها مع نتائج معامل امتصاص الصوت للعينات المحضرة في هذه الأطروحة.

جدول (10-4) دمج نتائج العينات المحضرة في هذه الأطروحة مع معامل امتصاص الصوت لمواد مختلفة [8]

المادة	معامل امتصاص الصوت ($\alpha \text{ cm}^{-1}$)
مواد غير عضوية	
ملاط اسمنتي	0.48
اسمنت مع البيرلايت الممدد	0.86
ألواح من الجبس مع ألياف زجاجية	0.83
صفائح اسمنتية مع مواد معدنية	0.6
بلوك	0.05
مواد عضوية	
ألواح فليزية	0.7
ألواح قش	(C) 0.12
ألواح خشب مقسى	(A) 0.19
ألواح سيليلوزية	(B) 0.31
مواد مسامية	
زجاج رغوي	0.33
بلاستيك رغوي	0.67
مواد ليفية	
صوف زجاجي	0.82

0.56	شعر اصطناعي
0.72	صوف الخبث

اختبارات المقاومة الميكانيكية لإجهاد الضغط

يبين الجدول التالي نتائج اختبار الضغط على السلسلتين الأولى والثانية من العينات:

جدول (4-11) نتائج المقاومة الميكانيكية لإجهاد الضغط للسلسلة الأولى من العينات

رقم العينة	المقاومة الميكانيكية للاختبار الأول (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الثاني (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الثالث (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الرابع (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الخامس (Mpa)	المقاومة الميكانيكية الوسطية (Mpa)
A1	5.42	7.604	5.052	5.494		5.89
B1	0.962	0.577	0.848	0.97	0.581	0.78
C1	0.97	0.91	0.739	1.047	0.881	0.9

جدول (4-12) نتائج المقاومة الميكانيكية لإجهاد الضغط للسلسلة الثانية من العينات

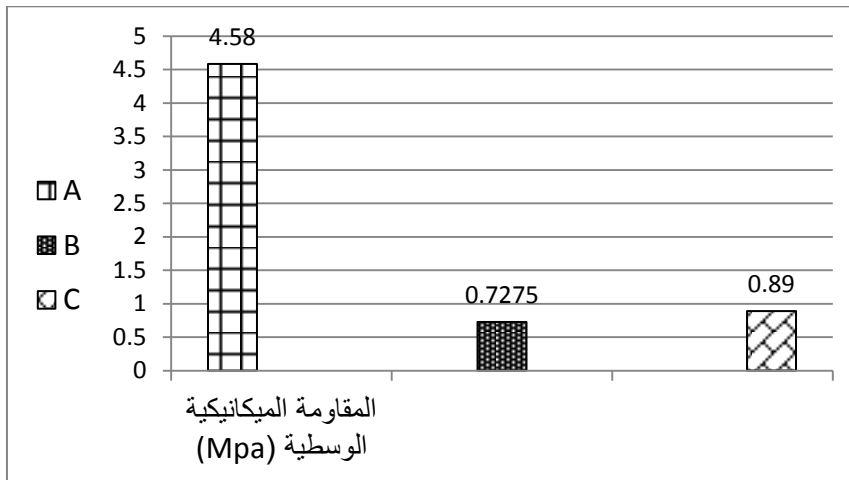
رقم العينة	المقاومة الميكانيكية للاختبار الأول (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الثاني (Mpa)	المقاومة الميكانيكية الوسطية (Mpa)
A2	3.87	2.67	3.27
B2	0.85	0.5	0.675
C2	0.85	0.91	0.88

وبالتالي نحصل على النتائج الوسطية النهائية للعينات السابقة بالشكل التالي:

جدول (4-13) نتائج المقاومة الميكانيكية النهائية لإجهاد الضغط

رقم العينة	المقاومة الميكانيكية للسلسلة الأولى (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للسلسلة الثانية (Mpa)	المقاومة الميكانيكية الوسطية (Mpa)
A	5.89	3.27	4.58
B	0.78	0.675	0.72
C	0.9	0.88	0.89

وتُترجم النتائج السابقة وفق المخطط الموضح بالشكل (4-9):



الشكل (4-9) المقاومة الميكانيكية للعينات

تحقق A أعلى مقاومة ميكانيكية نتيجة لإضافة المحلول NaOH على سطح العينة الأولى أثناء الصب بالاهتزاز والذي يقود إلى استمرارية التفاعل وتحسين أداء المقاومة الميكانيكية للعينة، لأنه يعزز الارتباط الكيميائي بين مكونات العينة، ويصنف أكسيد الكالسيوم كإحدى أهم المواد الرابطة. يوضح الجدول (4-14) مقارنة قيم المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية للعينات الناتجة مع المتطلبات الفيزيائية لعينات AAC وفق المواصفة C1693-09.

جدول (4-14) دمج نتائج المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية للعينات مع المواصفة ASTM C1693

ASTM C1693 TABLE 1 Physical Requirements		
Strength Class	Compressive Strength, (MPa)	Nominal Dry Bulk Density, (kg/m ³)
	0.72	
AAC-2	1.01 290	(400) (500)
AAC-4	580	(500) (600)
	4.58	(700) (800)
AAC-6	870	(600) (700) (800)

هذا ويوضح الجدول التالي (4-15)، دمج قيم المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية والإيصالية الحرارية للعينات الناتجة مع خصائص aerated concrete [16].

جدول (4-15) دمج نتائج المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية والإيصالية الحرارية للعينات مع خصائص aerated [16] concrete

الكثافة الجافة	الحجم الحبيبي	المقاومة الميكانيكية	الإيصالية الحرارية
450	70	3.171	0.12
(B)525	80	3.998	0.14
600	90	(A)4.481	0.16
675	100	6.274	(C)0.18
(C)750	110	7.515	(A+B)0.2

هذا ويوضح الجدول التالي (4-16)، دمج قيم المقاومة الميكانيكية والكثافة الظاهرية والإيصالية الحرارية للعينات الناتجة مع خصائص aerated concrete مع المواصفات القياسية السورية للعزل الحراري.

جدول (4-16) دمج نتائج العينات المحضرة في هذه الأطروحة مع المواصفات القياسية السورية للعزل الحراري (كود العزل السوري)

الإيصالية الحرارية $\frac{W}{m.K}$	الكثافة $\frac{Kg}{m^3}$	المادة
0.02	1.17	الهواء
0.042-0.038	288-96	ألياف صوف صخري
0.042-0.038	160-64	ألياف صوف زجاجي
0.045	80	حبيبات بيرلايت
0.045	15	حبيبات بولسيترين
0.07	400	ألواح مخلقات خشب مع إسمنت
0.04	300-140	صوف صخري- ألواح جاسئة
0.038	160-50	صوف صخري- شبه جاسئة
0.134	(B) 512-368	طبقة إسمنتية مع رمل دياتوميت
1.53	2200	حجر كلسي
0.48	1440	طينة إسمنت كلسي
1.2	1900	بلوك اسكنت عادي مليء
0.65	(A) 1000	بلوك إسمنتي عادي مفرغ
0.42	780	بلوك إسمنتي خفيف
(B) 0.21	(A) 1000	ألواح جيبس
0.16	950	ألواح جيبس مقوى بالكرتون
0.12	(C) 710	ألواح كرتون مقوى بالشمع
0.55	140	زجاج رغوي
(C) 0.19	1200	شرائح رقيقة من بولي فينيل كلوريد
(C) 0.19	1000	شرائح رقيقة من بولي إيثيلين
(A) 0.3	1200	شرائح مطاط إيثيلين بروبيلين

نلاحظ من الجدول (4-16): تتوافق A من حيث الكثافة الظاهرية مع البلوك الإسمنتي العادي المفرغ

وألواح الجيبس ومن حيث الإيصالية الحرارية مع شرائح مطاط إيثيلين بروبيلين.

تتوافق B من حيث الكثافة الظاهرية مع طبقة إسمنتية مع رمل دياتوميت ومن حيث الإيصالية الحرارية مع ألواح الجبس.

تتوافق C من حيث الكثافة الظاهرية مع ألواح الكرتون المقوى بالشمع ومن حيث الإيصالية الحرارية مع شرائح رقيقة من بولي فينيل كلوريد وشرائح رقيقة من بولي إيثيلين. خلصت الدراسة التجريبية في المرحلة الأولى إلى أن أكسيد الكالسيوم يقود إلى عينات بمقاومة ميكانيكية مرتفعة، وأن العينات التي لا تحمل أية إضافات (السلسلة الثانية من العينات) تنخفض فيها المقاومة الميكانيكية وترتفع فيها نسبة امتصاص الماء.

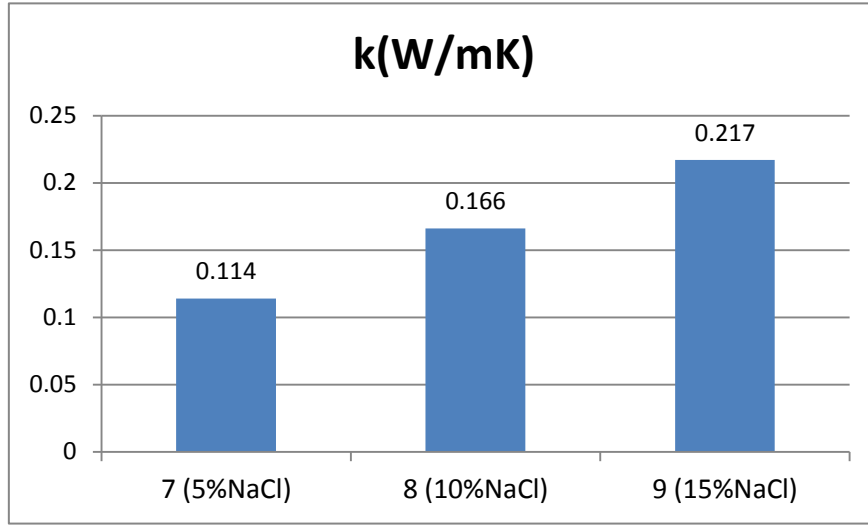
3-4 نتائج اختبارات المرحلة الثالثة

في هذه المرحلة يجري الاختبار على سلسلة من ثلاث عينات من تركيب كيميائي واحد وهو (الإسمنت+مسحوق الألمنيوم+ كلوريد الصوديوم+كربونات الكالسيوم) مع تغيير نسب ملح كلوريد الصوديوم المضافة، علماً أنه تم استبدال أكسيد الكالسيوم (الكلس الحي) بكربونات الكالسيوم $CaCO_3$ وهي مادة خام أولية وبتسخينها للدرجة $(1000^{\circ}C)$ يتم الحصول على أكسيد الكالسيوم (الكلس الحي). تم تحديد الإيصالية الحرارية للعينات الثلاث السابقة وفق الجدول التالي:

جدول (4-17) معامل التوصيل الحراري لعينات كلوريد الصوديوم

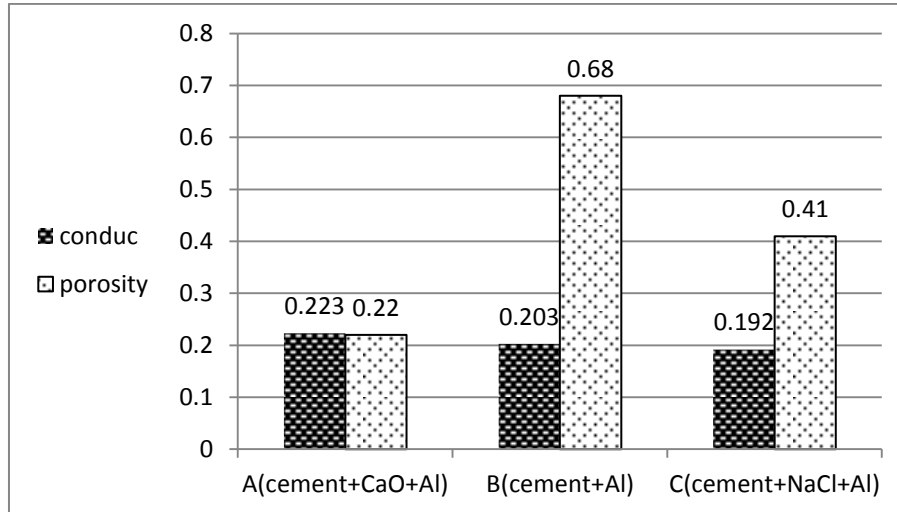
Q(W)	$A \times 10^{-4}(m^2)$	$L \times 10^{-2}(m)$	ΔT	$\frac{k}{W}$ ($\frac{m.K}{m.K}$)	العينة
9.6	$(14)^2$	0.7	30	0.114	7 (5%NaCl)
9.6	$(14.5)^2$	0.8	22	0.166	8 (10%NaCl)
9.6	$(14.6)^2$	1.35	28	0.217	9 (15%NaCl)

أظهرت العينة (7) أخفض قيمة لمعامل التوصيل الحراري كما هو موضح بالشكل (4-10)، كما أنه بازيدياد نسب كلوريد الصوديوم المضافة يزداد معامل التوصيل الحراري مما يؤثر سلباً على أداء العينات، وبإجراء



الشكل (4-10) معامل التوصيل الحراري لعينات كلوريد الصوديوم

مقارنة مع نتائج المرحلة الثانية كما هو موضح بالشكل (4-11) أن معامل التوصيل الحراري يرتفع مع انخفاض المسامية وذلك من أجل التركيب الكيميائي الأول A (إسمنت+أكسيد الكالسيوم+ألومنيوم)، أي تبدو العلاقة بين المسامية والإيصالية علاقة عكسية، لكن لم يقود الإرتفاع الكبير في مسامية B نسبة إلى A إلى انخفاض كبير في الإيصالية الحرارية ويعزى ذلك إلى اختلاف التركيب الكيميائي بين السلسلتين في المرحلة الثانية، إذ تصعب المقارنة بين نتائج المرحلة الثانية لاختلاف التركيب الكيميائي.



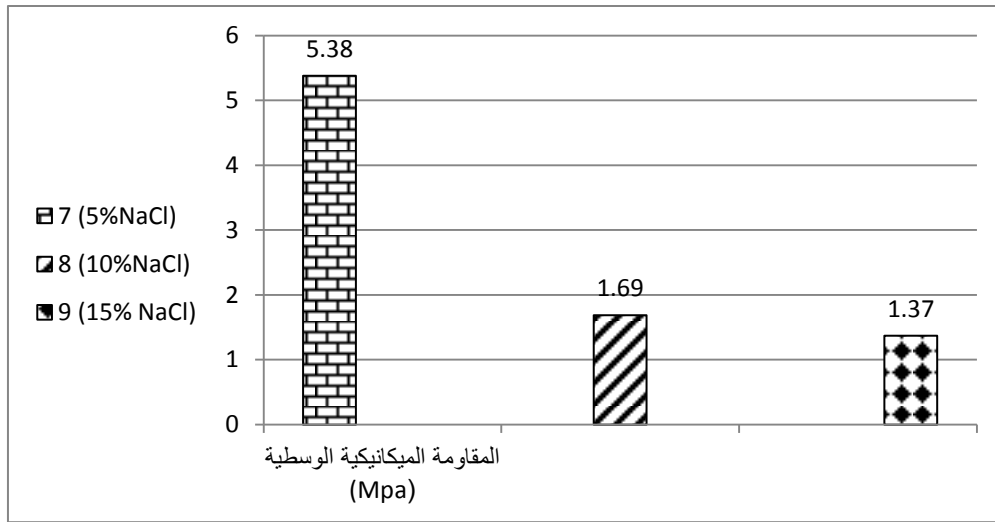
الشكل (4-11): مقارنة بين معامل التوصيل الحراري والمسامية لعينات المرحلة الثانية

أما فيما يتعلق بالمقاومة الميكانيكية فلقد تم تسجيل النتائج التالية:

جدول (4-18): نتائج المقاومة الميكانيكية لسلسلة عينات يدخل في تركيبها كلوريد الصوديوم

رقم العينة	المقاومة الميكانيكية للاختبار الأول (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الثاني (Mpa)	المقاومة الميكانيكية للاختبار الثالث (Mpa)	المقاومة الميكانيكية الوسطية (Mpa)
7	5.51	5.25	-	5.38
8	1.66	1.77	2.53	1.69
9	1.43	1.31	-	1.37

لنحصل على المخطط التالي الشكل (4-12) والذي يوضح تغير المقاومة الميكانيكية بتغير نسب ملح كلوريد الصوديوم المضافة.



الشكل (4-12): تغير المقاومة الميكانيكية لعينات كلوريد الصوديوم

نلاحظ من الشكل السابق أن العينة (7) ذات المحتوى الملحي الأخفض قد حققت أعلى قيمة للمقاومة الميكانيكية وبازدياد محتوى الملح من أجل العينات الأخرى، تتناقص المقاومة الميكانيكية، لذلك ينصح باستخدام ملح كلوريد الصوديوم وذلك بالمقارنة مع المرحلة الأولى لكن بنسبة لا تتجاوز 5 % بغية الحصول على مقاومة ميكانيكية جيدة نسبياً.

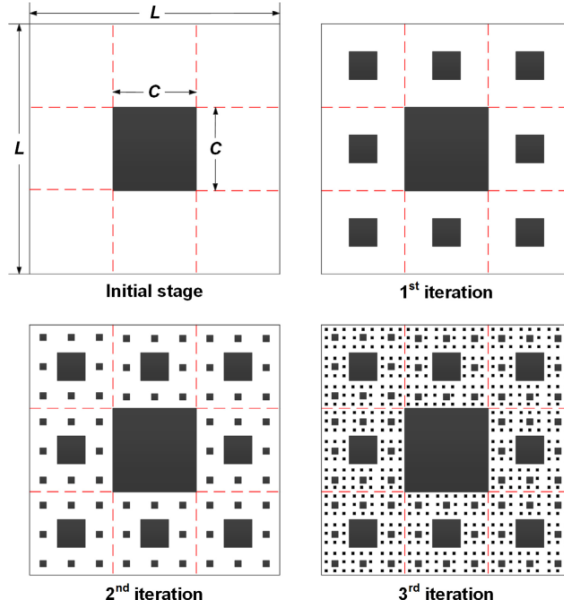
4-4 الدراسة التحليلية

تستخدم في هذه الدراسة عينتين بتركيب كيميائي متماثل تماماً، وذلك لتحديد معامل التوصيل الحراري للعينة العازلة ذات البنية المسامية في الحالة الرطبة (درجات ترطيب مختلفة) وفي الحالة الجافة. تم تحضير عينات AC (Aerated Concrete) لهذه الدراسة (دون معالجة باللاوتوكلاف) وبما يتوافق مع التركيب الكيميائي الأول A في المرحلة الأولى (الإسمنت+ أكسيد الكالسيوم+ مسحوق الألمنيوم) وتجدر الإشارة إلى أنه في الدراسة التحليلية تتم نمذجة الوسط المسامي في الحالة الجافة (مادة صلبة وهواء) وفي الحالة الرطبة (مادة صلبة وهواء وماء). ولإجراء النمذجة، تمثل جزيئات الاسمنت المادة الصلبة فقط لأن أكسيد

الكالسيوم يتفاعل مع مسحوق الألمنيوم وتم الاستغناء عن ملح كلوريد الصوديوم في الدراسة التحليلية، لتبقى المادة الصلبة في الدراسة التحليلية ممثلة بالإسمنت فقط، الأمر الذي يسهل عملية النمذجة التي ستتم وفقاً للهندسة الكسيرية.

وتم العمل في هذه الدراسة التحليلية وفق التسلسل التالي:

- في الحالة الرطبة: اعتمدت الدراسة التحليلية وفق الهندسة الكسيرية (حصيرة سيرينسكي) - التشابه الذاتي التام لتمثيل الوسط المسامي.



يترجم الشكل السابق الوسط المسامي للمادة العازلة باعتبار المناطق البيضاء تمثل المسام (الهواء) والمناطق الداكنة الجزئيات الصلبة (الإسمنت) حيث يتم تقسيم الطول الجانبي L إلى عدد من المربعات المركزية الداكنة بطول ضلع C ويمكن تكرار عملية التقسيم (n) مرة لتحدد المسامية وفق علاقات سابقة وردت في الدراسة المرجعية.

- يتحدد البعد الكسيري بدراسة التوزيع الحجمي والحبي لجزئيات الإسمنت الجافة المكونة للعينات

الاسمنتية الناتجة (عن طريق النخل) وتطبيق العلاقة: [38]

$$D_f = - \frac{\ln \left[\frac{M(r > R_i)}{M_T} * \left(\frac{R_{max}}{R_i} \right)^3 \right]}{\ln \left(\frac{R_i}{R_{max}} \right)}$$

حيث تمثل:

$M(r > R_i)$ الكتلة المتراكمة في المنخل ذو القطر الوسطي R_i

M_T الكتلة الإجمالية لجزئيات الإسمنت

R_{max} القطر الأعظمي للمناخل المستخدمة

حيث أن القطرين الأصغري والأعظمي R_{min} و R_{max} للمناخل المستخدمة في دراسة التوزع الحبي لجزيئات الاسمنت يرتبطان مع L, C وفق العلاقات: [36]

$$R_{min} = \frac{C}{\left(\frac{L-C}{2L}\right)^n} \quad (47)$$

$$R_{max} = C$$

- تتحدد أبعاد الوسط المسامي (L, C, n) بشكل كامل بحل جملة المعادلات السابقة التي تحدد ϕ و D_f و R_{min} و R_{max} باستخدام MATLAB.
- يُمثل الطور الرطب وفق حصيرة سيرينسكي باللون الرمادي ويشتمل الطور الرطب $S_w^{(0)}$ على: [35]

$$S_w^{(0)} = S_{wsp}^{(0)} + S_{wb}^{(0)} \quad (48)$$

- ✓ S_{wsp} ويمثل الطور الرطب المحيط بالجزيئات.
- ✓ S_{wb} ويمثل الطور الرطب المتعلق بجسور الرطوبة التي تصل الجزيئات الصلبة بين بعضها البعض.

تشير w إلى الطور الرطب، تشير p إلى طور المسام، تشير b إلى جسور الرطوبة (bars).

تتحدد S_{wsp} من مساحة المنطقة الرطبة (الرمادية) المحيطة بالمادة الصلبة (المربع الأسود) نسبةً إلى

مساحة المسام الكلية في تمثيل سيرينسكي (البيضاء) وفق العلاقة: [35]

$$S_{wsp}^{(0)} = \frac{V_{wsp}}{V_p} = \frac{(r^{(0)} + C^{(0)})^2 - C^{(0)2}}{L^{(0)2} - C^{(0)2}}$$

$$= \frac{L^{(0)2}}{L^{(0)2} - C^{(0)2}} \left[\left(r^{(0)+} + \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right)^2 - \left(\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right)^2 \right] \quad (49)$$

تتحدد S_{wb} من مساحة الجسور الرطبة (الرمادية) التي تصل بين جزيئات المادة الصلبة (المربع الأسود)

نسبةً إلى مساحة المسام الكلية في تمثيل سيرينسكي (البيضاء) وفق العلاقة: [35]

$$S_{wb}^{(0)} = \frac{V_{wb}}{V_p} = \frac{4t^{(0)} \left(\frac{L^{(0)} - C^{(0)} - r^{(0)}}{2} \right)}{L^{(0)2} - C^{(0)2}} \quad (50)$$

$$= \frac{L^{(0)2}}{L^{(0)2} - C^{(0)2}} \cdot 2t^{(0)+}$$

$$\cdot \left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} - r^{(0)+} \right)$$

حيث أن: $r^{(0)+} = \frac{r^{(0)}}{L^{(0)}}$ وتمثل سماكة الحاجز اللابيدي

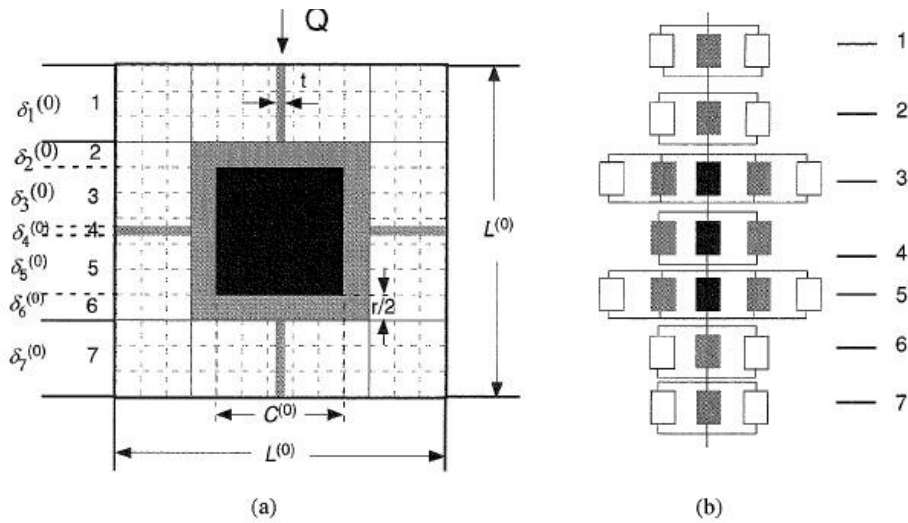
حيث أن: $t^{(0)+} = \frac{t^{(0)}}{L^{(0)}}$ وتمثل سماكة الطور الرطب اللابيدي

ومن أجل تكرار n مرة نكتب: [35]

$$S_{wsp}^{(n)} = \frac{L^{(n)2}}{C^{(n)2}} \left[\left(\frac{L^{(n)2}}{L^{(n)2} - C^{(n)2}} \right)^{n+1} - 1 \right] \left[\left(\frac{r^{(n)}}{L^{(n)}} + \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} \right)^2 - \left(\frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} \right)^2 \right] \quad (51)$$

$$S_{wb}^{(n)} = \frac{L^{(n)2}}{C^{(n)2}} \left[\left(\frac{L^{(n)2}}{L^{(n)2} - C^{(n)2}} \right)^{n+1} - 1 \right] \left[2t^{(n)+} \cdot \left(1 - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} - r^{(n)+} \right) \right] \quad (52)$$

- تتحدد المقاومات الحرارية بتقسيم الخلية الواحدة وفق تمثيل سيرينسكي إلى سبع مناطق بسماكات مختلفة: $\delta_1^{(0)}$ ، $\delta_2^{(0)}$ ، $\delta_3^{(0)}$ ، $\delta_4^{(0)}$ ، $\delta_5^{(0)}$ ، $\delta_6^{(0)}$ ، $\delta_7^{(0)}$ ويفرض أن معامل التوصيل الحراري في الإسمنت k_s والهواء k_g والماء k_w عند درجة حرارة 22°C يكون:



من أجل $\delta_1^{(0)}$: تقسم المقاومة الحرارية إلى ثلاث مقاومات: مقاومة حرارية للمسار الهوائية

عدد(2)، مقاومة الجسر الرطب بسماكة t وفق العلاقة التالية: [35]

$$\frac{1}{R_1^{(0)}} = \frac{2k_g \left(\frac{L^{(0)} - t^{(0)}}{2} \right)}{L^{(0)} - C^{(0)} - r^{(0)}} + \frac{k_w t^{(0)}}{L^{(0)} - C^{(0)} - r^{(0)}} \quad (53)$$

من أجل $\delta_2^{(0)}$: تقسم المقاومة الحرارية إلى خمس مقاومات: مقاومة حرارية للمسار الهوائية

عدد(2)، مقاومة المنطقة الرطبة المحيطة بالجزء الصلب بسماكة $r/2$ وفق العلاقة التالية:

$$\frac{1}{R_2^{(0)}} = \frac{2k_g \frac{L^{(0)} - C^{(0)} - r^{(0)}}{2}}{\frac{r}{2}} + \frac{k_w (C^{(0)} + r^{(0)})}{\frac{r}{2}} \quad (54)$$

من أجل $\delta_3^{(0)}$: تقسم المقاومة الحرارية إلى ثلاث مقاومات: مقاومة حرارية للمسار الهوائية

عدد(2)، مقاومة المنطقة الرطبة المحيطة بالجزء الصلب بسماكة $r/2$ عدد(2)، مقاومة الجزء

الصلب وفق العلاقة التالية:

$$\frac{1}{R_3^{(0)}} = \frac{2k_g \frac{L^{(0)} - C^{(0)} - r^{(0)}}{2}}{\frac{C^{(0)} - t^{(0)}}{2}} + \frac{2k_w \frac{r^{(0)}}{2}}{\frac{C^{(0)} - t^{(0)}}{2}} + \frac{k_s \cdot C^{(0)}}{\frac{C^{(0)} - t^{(0)}}{2}} \quad (55)$$

من أجل $\delta_4^{(0)}$: تقسم المقاومة الحرارية إلى خمس مقاومات: مقاومة حرارية للجسر الرطب

بسماكة t عدد(2)، مقاومة المنطقة الرطبة المحيطة بالجزء الصلب بسماكة $r/2$ عدد(2)، مقاومة

الجزء الصلب وفق العلاقة التالية:

$$\frac{1}{R_4^{(0)}} = \frac{2k_w \frac{L^{(0)} - C^{(0)} - r^{(0)}}{2}}{t^{(0)}} + \frac{2k_w \frac{r^{(0)}}{2}}{t^{(0)}} + \frac{k_s \cdot C^{(0)}}{t^{(0)}} \quad (56)$$

وبما أن:

$$R_7^{(0)} = R_1^{(0)} \text{ و } R_6^{(0)} = R_2^{(0)} \text{ و } R_5^{(0)} = R_3^{(0)}$$

تكون المقاومة الحرارية الإجمالية وفق حصيرة سيرينسكي:

$$R_{sc}^{(0)} = R_1^{(0)} + R_2^{(0)} + \dots + R_7^{(0)} \quad (57)$$

$$R_{sc}^{(0)} = \frac{1}{k_g} \left\{ \frac{1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}}{\left[(1 - t^+) + \beta_{wg}^{(0)} \cdot t^+ \right]} \right. \quad (58)$$

$$+ \frac{r^{(0)+}}{\left(1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{wg}^{(0)} \left(\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} + r^{(0)+} \right)}$$

$$+ \frac{\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} - t^{(0)+}}{\left(1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{wg}^{(0)} r^{(0)+} + \beta_{sg}^{(0)} \cdot \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}}$$

$$\left. + \frac{t^{(0)+}}{\left[\beta_{wg}^{(0)} \left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{sg}^{(0)} \cdot \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right]} \right\}$$

• يتحدد معامل التوصيل الحراري وفق العلاقة: [35]

$$k_{e,sc}^{+(0)} = \frac{k_{e,sc}^{(0)}}{k_g} = \frac{L^{(0)}}{R_{sc}^{(0)} \cdot A^{(0)} \cdot k_g}$$

$$A^{(0)} = L^{(0)} \times 1$$

$A^{(0)}$ تمثل المساحة الكلية للمقطع العرضي الظاهر.

$k_{e,sc}^{(0)}$ معامل التوصيل الحراري الفعال وفق حصيرة سيرينسكي من أجل المرحلة (0) الابتدائية.

$k_{e,sc}^{+(0)}$ معامل التوصيل الحراري الفعال اللابعدوي وفق حصيرة سيرينسكي من أجل المرحلة (0) الابتدائية.

$$\begin{aligned}
k_{e,sc}^{+(0)} = & \left\{ \frac{1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}}{\left[(1 - t^{(0)+}) + \beta_{wg}^{(0)} \cdot t^{(0)+} \right]} \right. \\
& + \frac{r^{(0)+}}{\left(1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{wg}^{(0)} \left(\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} + r^{(0)+} \right)} \\
& + \frac{\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} - t^{(0)+}}{\left(1 - r^{(0)+} - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{wg}^{(0)} r^{(0)+} + \beta_{sg}^{(0)} \cdot \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}} \\
& \left. + \frac{t^{(0)+}}{\left[\beta_{wg}^{(0)} \left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{sg}^{(0)} \cdot \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right]} \right\}^{-1}
\end{aligned} \tag{59}$$

ويفرض أن معامل التوصيل الحراري للإسمنت k_s وللهواء k_g وللماء k_w يكون:

$$\beta_{wg}^{(0)} = \frac{k_w}{k_g}$$

$$\beta_{sg}^{(0)} = \frac{k_s}{k_g}$$

تُكتب صيغة لمعامل التوصيل الحراري اللابيدي بعد تكرار لـ n مرة انطلاقاً من المعادلة (59):

$$\begin{aligned}
k_{e,sc}^{+(n)} = k_{e,sc}^{+(n-1)} & \left\{ \frac{1 - r^{(n)+} - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}}}{\left[(1 - t^{(n)+}) + \beta_{wg}^{(n)} \cdot t^{(n)+} \right]} \right. \\
& + \frac{r^{(n)+}}{\left(1 - r^{(n)+} - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} \right) + \beta_{wg}^{(n)} \left(\frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} + r^{(n)+} \right)} \\
& + \frac{\frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} - t^{(n)+}}{\left(1 - r^{(n)+} - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} \right) + \beta_{wg}^{(n)} r^{(n)+} + \beta_{sg}^{(n)} \cdot \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}}} \\
& \left. + \frac{t^{(n)+}}{\left[\beta_{wg}^{(n)} \left(1 - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} \right) + \beta_{sg}^{(n)} \cdot \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} \right]} \right\}^{-1}
\end{aligned} \tag{60}$$

حيث أن:

$$\beta_{wg}^{(n)} = \frac{\beta_{wg}^{(0)}}{k_{e,sc}^{+(n-1)}}$$

$$\beta_{sg}^{(n)} = \frac{\beta_{sg}^{(0)}}{k_{e,sc}^{+(n-1)}}$$

- يتم فرض ثابت تجريبي $\frac{S_{wsp}}{S_w} = cn$ لدراسة مدى ارتباط القيم النظرية بالتجريبية لمعامل التوصيل الحراري وبالتعويض في العلاقة (55) يتم تحديد $t^{(n)+}$ و $r^{(n)+}$ بدلالة cn .
- تتحدد الكثافة الظاهرية بهدف تحديد محتوى الرطوبة الموافق لكل عينة .
- يتحدد معامل التوصيل الحراري اللابعدي $k_{e,sc}^{+(n)}$ بعد دراسة المقومات الحرارية.
- يتحدد معامل التوصيل الحراري تجريبياً k_{exp} من جهاز الإيصالية الحرارية الذي ورد سابقاً.
- يتم رسم منحنى بياني باستخدام MATLAB لربط القيم النظرية بالتجريبية، يبين هذا المنحنى تغير قيمة معامل التوصيل الحراري النظري $k_{theo,wet}$ بتغير قيمة الثابت التجريبي cn ، وبإسقاط قيمة معامل التوصيل الحراري التجريبي $k_{exp,wet}$ على المنحنى المذكور نحصل على قيمة الثابت التجريبي.
- في الحالة الجافة: تقسم الدراسة في الحالة الجافة إلى حالتين:
 - ✓ الحالة الأولى: عندما تغيب جسور الرطوبة بين الجزيئات الصلبة S_{wsp} وتغيب الرطوبة المحيطة بالجزيئات (المناطق الرمادية) S_{wb} ، يغيب الاتصال بين الجزيئات (لا توجد جسور للمادة الصلبة بين الجزيئات الصلبة)، عندها يتم تحديد معامل التوصيل الحراري النظري وتتم مقارنته مع معامل التوصيل الحراري التجريبي في الحالة الجافة.
 - ✓ الحالة الثانية: توافق غياب جسور الرطوبة بين الجزيئات وغياب الرطوبة المحيطة بالجزيئات، مع وجود اتصال بين الجزيئات (يتم الاتصال عبر جسور للمادة الصلبة بين الجزيئات)، وتتم مقارنته مع معامل التوصيل الحراري التجريبي في الحالة الجافة.
- حالة الإشباع الكامل بالرطوبة: تغطي الرطوبة كافة المسام الهوائية، لتشمل المناطق البيضاء كافةً، وفي هذه المرحلة نستنتج علاقة معامل التوصيل الحراري النظري في حالة الإشباع الكامل للرطوبة، ولا يمكن تحديدها تجريبياً ضمن إمكانيات الجهاز المتوفرة في مخبر الفيزياء- كلية الهندسة الميكانيكية.

5-4 نتائج الدراسة التحليلية

تم إجراء اختبار المسامية والكثافة الظاهرية بعد الجفاف التام للعينات وفق ASTM-20-00 وهذا موضح بالجدول التالية:

جدول (4-19) الوزن الجاف والمعلق والمشبع

الوزن المشبع W (g)	الوزن المعلق S (g)	الوزن الجاف D (g)	العينة
46.74	8.6	19.932	10
36.5	7.51	16.0654	11

فتكون المسامية والكثافة الظاهرية بالشكل التالي:

جدول (4-20) نتائج المسامية والكثافة الظاهرية

المسامية الظاهرية ϕ %	الكثافة الظاهرية kg/m^3	الحجم V (cm^3)	العينة
70.28	522.6	38.14	10
70.5	554	28.99	11

وبالانتقال إلى الدراسة التحليلية وفق المراجع وباعتماد على الهندسة الكسيرية ونظرية العالم ماندلبرت،

يتم تمثيل ذلك في الوسط ذي التشابه الذاتي وفق حصيرة سيرينسكي:

يتم تحديد البعد الكسيري D_f وفق المرجع [36] اعتماداً على التوزيع الحجمي للجزيئات المشكلة للعينة المدروسة، وهذا ما تم تنفيذه في هذه الدراسة حيث تم نخل المكونات الدقيقة الجافة المكونة للعينة الإسمنتية قبل مزجها مع الماء. يتم النخل باستخدام مناخل هزازة في مخبر الصناعات الكيماوية اللاعضوية في كلية العلوم لنحصل على التوزيع الحجمي والوزني لجزيئات الإسمنت المشكلة لكل عينة كما هو موضح بالجدول (4-21).

جدول (4-21) التوزيع الوزني والحجمي للجزيئات

الوزن (%)		الوزن (gr)		حجم الجزيئة
العينة الثانية	العينة الأولى	العينة الثانية	العينة الأولى	
3.541667	1.962202	3.4	1.9	(10-25) μm
7.1875	7.952081	6.9	7.7	(25-45) μm
48.125	49.98451	46.2	48.4	(45-63) μm
37.8125	38.72767	36.3	37.5	(63-100) μm
3.020833	1.208303	2.9	1.17	(100-125) μm
0.3125	0.165238	0.3	0.16	(125-150) μm
100	100	96	96.83	المجموع

تم تمرير جزيئات الإسمنت على مناخل بأقطار تتراوح من $10\mu\text{m}$ وحتى $150\mu\text{m}$ كما هو موضح بالشكل (4-13) فتكون نسبة أكبر قطر إلى أصغر قطر للجزيئات هو 15.



الشكل (4-13) المناخل المستخدمة في تحديد التوزيع الحجمي والحبي لجزيئات الإسمنت

يُحدد البعد الكسيري حسب المرجع [38] وفقاً للمعادلة (36) التي وردت سابقاً، يتم ذلك وفق مراحل (باستخدام برنامج Microsoft Excel). تُلخص النتائج بالجدول (4-22) ليمثل الحقل الأول الوزن الناتج عن كل منخل بالغرام ويمثل الحقل الثاني النسبة المئوية للوزن المتجمع في كل منخل، وتشير R_1 و R_2 إلى قطر المنخل الأعلى وقطر المنخل الأدنى و R_i إلى القطر الوسطي ويشير $M(r > R_i)$ إلى الوزن التراكمي (كنسبة مئوية) وتشير R_{max} إلى القطر الأعظمي بين كل المناخل.

ومن الجدول (22-4) يمكن الحصول على البعد الكسيري D_f ليتم إدراجه مع المسامية والكثافة الظاهرية وفق الجدول التالي (23-4):

جدول (23-4): المتغيرات الأساسية

الكثافة الظاهرية kg/m^3	المسامية ϕ (%)	البعد الكسيري D_f	R_{\max}/R_{\min} (نسبة أكبر قطر للمناخل إلى أصغر قطر)	
522.6	70.28	2.34	32	العينة 10
554	70.5	2.38	32	العينة 11

وحيث أن الأقطار الأعظمية والأصغرية للمناخل ترتبط مع L, C وفق العلاقات: [36]

$$R_{\min} = \frac{C}{\left(\frac{L-C}{2L}\right)^n}$$

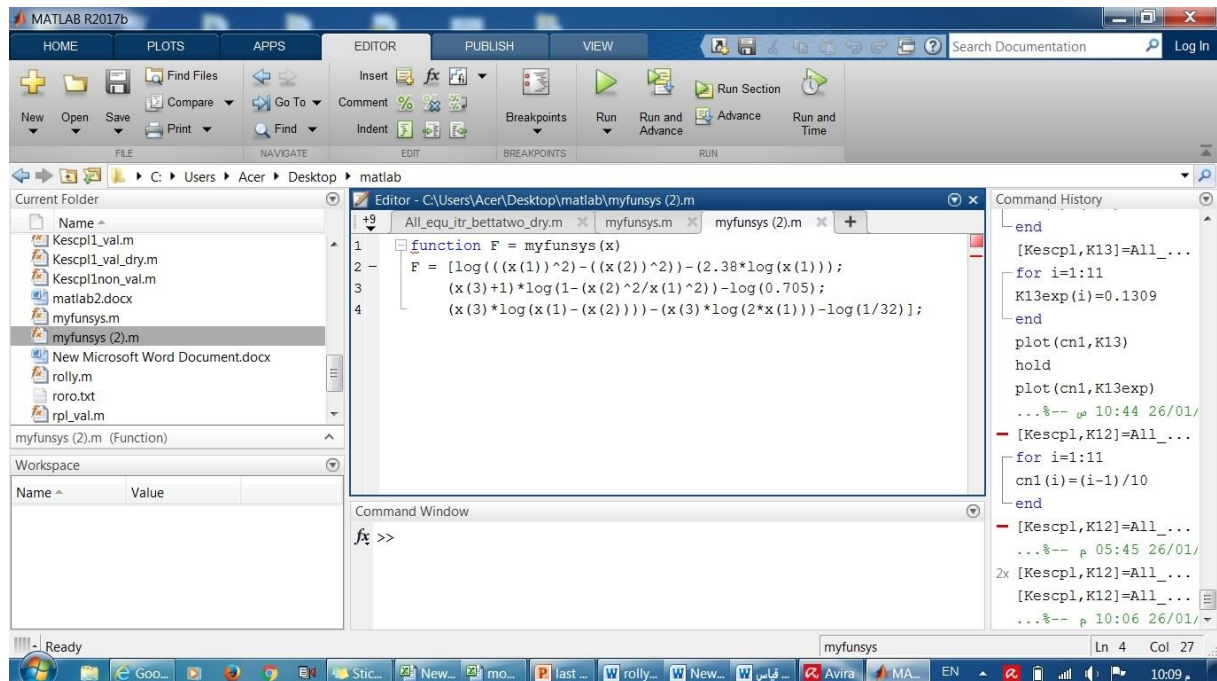
$$R_{\max} = C$$

ويحل جملة المعادلات (26) و(27) و(47) عن طريق Matlab كما هو موضح بالشكل (14-4)

وهي جملة معادلات لا خطية فإننا نحصل على النتائج الموضحة بالجدول التالي:

جدول (24-4) قيم L, C, n التجريبية لحصيرة سيرينسكي

n	C	L	R_{\max}/R_{\min}	D_f	ϕ	
4	0.2192	0.7902	15	2.34	0.7028	العينة 10
4	0.2241	0.8118	15	2.38	0.705	العينة 11



الشكل (14-4): استخدام matlab في حل جملة ثلاث معادلات بثلاثة مجاهيل

اعتمد الباحثون [24] على فرض قيمة $L=3$ و $C=1$ وعلى فرض قيمة $L=13$ و $C=1,2,3$ لحساب قيمة D_f ، وبإسقاط قيم المسامية التجريبية التي حصلنا عليها من العينتين على قيم D_f المحسوبة من الفرضيات السابقة نحصل على الجدول (4-25):

جدول (4-25): قيم L, C, n لخصيرة سيرينسكي وفق المرجع [34]

الدراسة الحالية					المرجع [34]					
n	D_f	C	L	ϕ	n	D_f	C	L	ϕ	
4	2.34	0.2192	0.7902	0.7028	1.99	1.89	1	3	0.7028	العينة 10
4	2.38	0.2241	0.8118	0.705	1.96	1.89	1	3	0.705	العينة 11
				0.7028		1.997	1	13	0.7028	العينة 10
				0.705		1.997	1	13	0.705	العينة 11
				0.7028		1.459	2	13	0.7028	العينة 10
				0.705		1.459	2	13	0.705	العينة 11
				0.7028		1.14	3	13	0.7028	العينة 10
				0.705		1.14	3	13	0.705	العينة 11

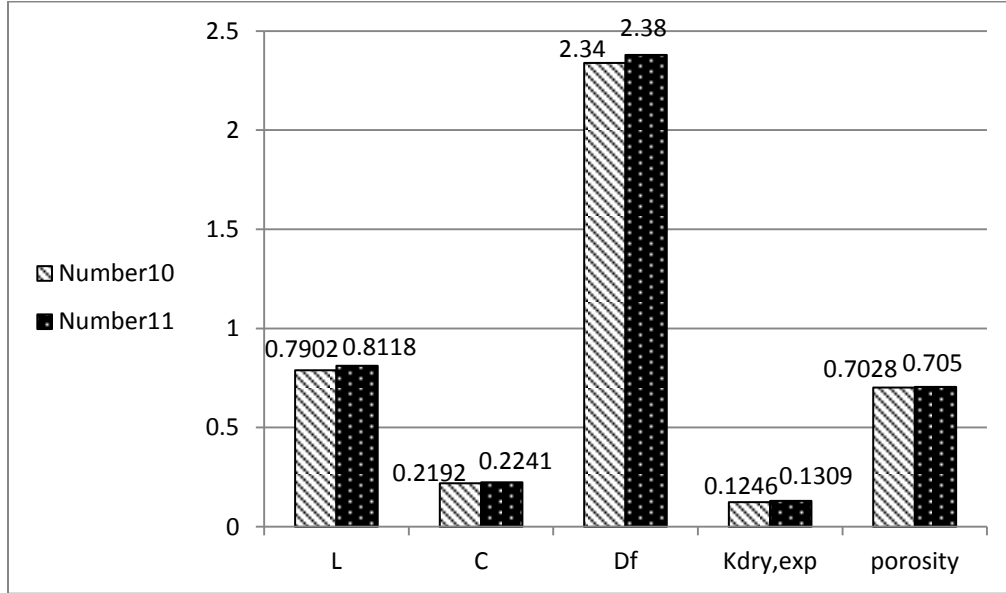
اعتمد الباحثون [25] على فرض قيم $L=13$ و $C=5,7,9$ لنحصل على الجدول (4-26):

جدول (4-26): قيم L, C, n لخصيرة سيرينسكي وفق المرجع [35]

الدراسة الحالية					المرجع [35]					
n	D_f	C	L	ϕ	n	D_f	C	L	ϕ	
4	2.34	0.2192	0.7902	0.7028	1.2	1.93	5	13	0.7028	العينة 10
4	2.38	0.2241	0.8118	0.705	1.18	1.93	5	13	0.705	العينة 11
				0.7028	0.03	1.86	7	13	0.7028	العينة 10
				0.705	0.02	1.86	7	13	0.705	العينة 11
				0.7028	-	1.74	9	13	0.7028	العينة 10
				0.705	-	1.74	9	13	0.705	العينة 11

نلاحظ من الجداول السابقة (4-25) و (4-26) أنه ليست كل القيم التي تفرض في المراجع الأخرى ل L, C يمكن أن تقود إلى أعداد موجبة ل n ، وهذا الأمر مرتبط بمسامية المادة، ومن أجل قيم المسامية للعينتين 10 و 11، فإن الفرضيات المقبولة هي $L=3$ و $C=1$ بالإضافة إلى $L=13$ و $C=5,7$ فقط. بمقارنة قيمة D_f التي حصلنا عليها تجريبياً من التوزيع الحبي للجزيئات وقيم L, C, n الناتجة عن حل جمل المعادلات، بالمقارنة مع القيم النظرية المفروضة في مراجع أخرى، نجد أن القيم التجريبية المحققة للنمذجة المتبعة في هذه الأطروحة تبقى ضمن القيم المقبولة من حيث البعد الكسيري، ورقم التكرار $n=2.3-2.5$ (الذي يجب أن يقرب إلى رقم صحيح) أما من حيث المعنى الفيزيائي فإن C لا يمكن إلا أن تكون أصغر من L ومن الواضح أن الإبصالية الحرارية تتناقص بازدياد المسامية ويعزى ذلك إلى وجود الفراغات الهوائية التي تقوم بدور العازل في المادة.

تتقارب بشدة أبعاد الوسط المسامي و قيم الإيصالية الحرارية والمسامية بين العينتين (11) و (12) كما هو موضح بالشكل (4-15)، تتماثل العينتان في التركيب الكيميائي وتتشابهان في الخصائص (الحالة الجافة) وهذا يدل على أن المزج يتم بشكل متجانس، وأن الصب ضمن القوالب يتم أيضاً بشكل متجانس.



الشكل (4-15) مقارنة خصائص وأبعاد الوسط المسامي للعينتين (10) و(11)

1-4-4 الحالة الرطبة:

بعد أن تم فصل العينتين عن القالب، جففت العينتان في الفرن، وباستخدام الرش تم الحصول على درجتى اشباع بالرطوبة مختلفتين للعينتين وقيست أوزان العينتين قبل الترطيب m_m وبعد الترطيب m_d لحساب وزن الماء m_d ، ثم حسبت درجة الإشباع كمايلي: [34]

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} = \left(\frac{\rho}{\rho_w} \right) \left(\frac{c}{\phi} \right) \quad (61)$$

وحيث أن c هو محتوى الرطوبة وبحسب من المعادلة التالية: [34]

$$c = \frac{m_w}{m_d} \quad (62)$$

حيث تمثل m_m الكتلة بعد الترطيب وتمثل m_d الكتلة الجافة لتحسب كتلة الماء m_w من العلاقة التالية: [34]

$$m_w = m_m - m_d \quad (63)$$

ρ تمثل الكثافة الظاهرية للعينات وتحسب وفق ASTM-C20-00.

ρ_w تمثل كثافة الماء $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$ من أجل درجة حرارة 22°C . يوضح الجدول التالي (4-

25)، حساب درجة الإشباع.

جدول (27-4) حساب درجة الإشباع

S_w	ϕ	ρ/ρ_w	ρ_w	ρ	$c(m_w/m_d)$	m_w	m_d	m_m	
			(Kg/m ³)	(Kg/m ³)		(g)	(g)	(g)	
0.291	0.7028	0.554	998.000	552.600	0.370	66.92	181.083	248	العينة 1
0.313	0.705	0.555	998.000	554.000	0.397	55.15	138.85	194	العينة 2

تم تحديد معامل التوصيل الحراري التجريبي من جهاز قياس الإيصالية الحرارية لنحصل على النتائج التالية:

جدول (28-4) معامل التوصيل الحراري التجريبي لكل عينة في الحالة الرطبة

$k_{exp}(\frac{W}{m.K})$	ΔT	$L \times 10^{-2}(m)$	$A \times 10^{-4}(m^2)$	العينة
0.12465	29	0.9	(14.8) ²	1
0.1361	24	0.7	(14) ²	2

يُعمد الثابت تجريبي $\frac{S_{wsp}}{S_w} = cn$ لمقارنة القيم النظرية بالتجريبية لمعامل التوصيل الحراري، وبتعويض الثابت

التجريبي في العلاقات (48)،(51)،(52) يتم الحصول على: [35]

$$r^{(n)+} = \sqrt{\frac{cn.S_w}{\frac{L^{(n)2}}{C^{(n)2}} \left[\left(\frac{L^{(n)2}}{L^{(n)2} - C^{(n)2}} \right)^{n+1} - 1 \right]}} + \frac{C^{(n)2}}{L^{(n)2}} - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}}}$$

$$= \sqrt{\frac{cn.S_w}{\frac{L^{(n)2}}{C^{(n)2}} \left[\left(\frac{L^{(n)2}}{L^{(n)2} - C^{(n)2}} \right)^{n+1} - 1 \right]}} + \frac{C^{(n)2}}{L^{(n)2}} - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}}} \quad (64)$$

$$t^{(n)+} = \frac{4cn.S_w}{2 \frac{L^{(n)2}}{C^{(n)2}} \left[\left(\frac{L^{(n)2}}{L^{(n)2} - C^{(n)2}} \right)^{n+1} - 1 \right] \cdot \left(1 - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} - r^{(n)+} \right)}$$

$$= \frac{4cnS_w}{2 \frac{L^{(n)2}}{C^{(n)2}} \left[\left(\frac{L^{(n)2}}{L^{(n)2} - C^{(n)2}} \right)^{n+1} - 1 \right] \cdot \left(1 - \frac{C^{(n)}}{L^{(n)}} - r^{(n)+} \right)} \quad (65)$$

وبتعويض قيم معامل التوصيل الحراري في الإسمنت k_s والهواء k_g والماء k_w عند درجة حرارة 22°C يصبح

المعاملان $\beta_{wg}^{(0)}$ و $\beta_{sg}^{(0)}$ بالشكل: [35]

$$\beta_{wg}^{(0)} = \frac{k_w}{k_g} = \frac{0.6}{0.024} = 25$$

$$\beta_{sg}^{(0)} = \frac{k_s}{k_g} = \frac{0.29}{0.024} = 12.08$$

الثابت التجريبي cn تتراوح قيمته من 0 وحتى 1 وبتعويض قيم $\beta_{wg}^{(0)}$ و $\beta_{sg}^{(0)}$ في المعادلة (62) مع قيم التكرار n وبإدخال حلقة لحساب $\beta_{wg}^{(n)}$ و $\beta_{sg}^{(n)}$ في برنامج matlab ومع الأخذ بعين الاعتبار أن معامل التوصيل الحراري المحسوب من البرنامج هو لا بعدي ومعامل التوصيل الحراري التجريبي الذي نحصل عليه من الجهاز هو بعدي، فإن حاصل جداء معامل التوصيل الحراري النظري المحسوب اللابعدي $k_{e,sc}^{+(n)}$ (من معادلة (24)) مع $k_g = 0.024 \frac{W}{m.K}$ يقود إلى معامل التوصيل الحراري النظري البعدي k_{theo} . يوضح الجدول (27-4) مقارنة بين النتائج النظرية والتجريبية.

جدول (29-4) معامل التوصيل الحراري النظري والتجريبي لكل عينة في الحالة الرطبة

نسبة الخطأ %	$K_{exp,w}$ (التجريبي) $\left(\frac{W}{m.K}\right)$	$k_{theo,w}$ (النظري) $\left(\frac{W}{m.K}\right)$	
2.8	0.1246	0.1281	العينة 10
3.97	0.1309	0.1361	العينة 11

يعزى الخطأ بين القيم النظرية والتجريبية في الجدول (27-4) للأسباب التالية:

1. أخطاء القياس من الجهاز لدى تحديد معامل التوصيل الحراري كما هو موضح بالجدول (28-4):

$$P = V \times I = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} = k \cdot A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta X}{X} + \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2}$$

$$\Delta V = 0.025 \text{ V}, \Delta I = 0.025 \text{ A}, \Delta X = 1 \text{ mm}, \Delta T_1 = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta k}{0.1246} = 0.0805 \Rightarrow \Delta k = 0.01003 \frac{W}{m.K}$$

$$\frac{\Delta k}{0.1309} = 0.0805 \Rightarrow \Delta k = 0.0105 \frac{W}{m.K}$$

جدول (30-4) يبين مقدار الخطأ في قيمة معامل التوصيل الحراري التجريبي في الحالة الرطبة

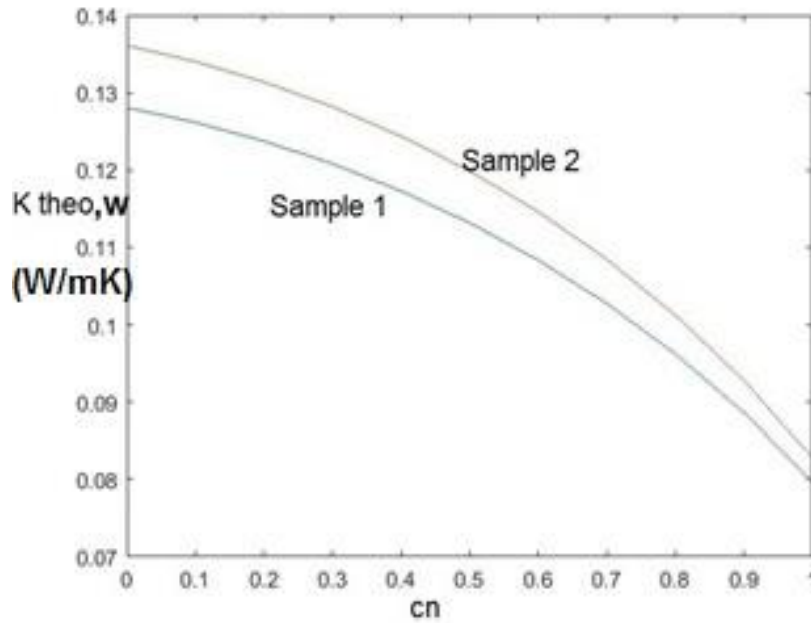
$\left(\frac{W}{m.K}\right) \Delta k_{exp,w}$	$\left(\frac{W}{m.K}\right) k_{exp,w}$	
0.01003	0.1246	العينة 10
0.0105	0.1309	العينة 11

2. أخطاء تتعلق بالميزان لدى قياس الكثافة والمسامية ودرجة الرطوبة.

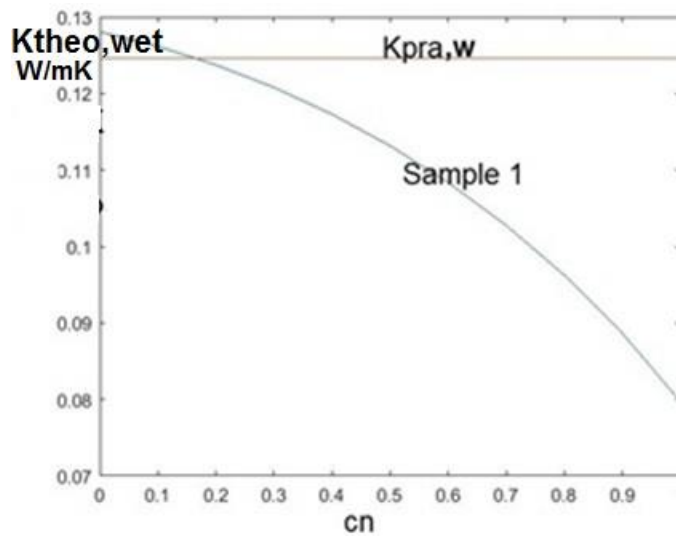
3. أخطاء تتعلق بقياس البعد الكسيري لدى أداء عملية النخل (إهمال الإسمنت العالق في كل منخل).

4. أخطاء تتعلق بشروط الوسط المحيط مع العلم أن التجارب أنجزت في درجة حرارة الغرفة أي $(22 - 25)^\circ\text{C}$.

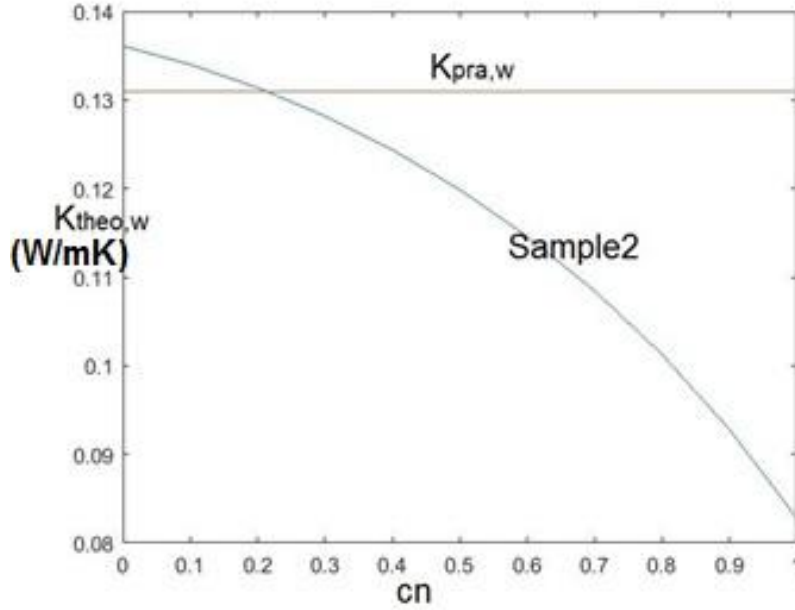
تم استخدام MATLAB لرسم منحنى بياني يبين تغير قيمة معامل التوصيل الحراري النظري k_{theo} بتغير قيمة الثابت التجريبي cn لكلا العينتين كما هو موضح بالشكل (4-16). بإسقاط قيمة معامل التوصيل الحراري التجريبي k_{exp} على المنحنى المذكور من أجل العينة الأولى نحصل على قيمة الثابت التجريبي $cn(S1) = 0.18$ كما هو موضح بالشكل (4-17)، وبتكرار الأمر مع العينة الثانية نحصل على قيمة الثابت التجريبي وهي $cn(S2) = 0.22$ كما هو موضح بالشكل (4-18).



الشكل (4-16) تغير الثابت التجريبي مع قيمة معامل التوصيل الحراري النظرية للعينتين معاً في الحالة الرطبة



الشكل (4-17) الثابت التجريبي للعينة الأولى في الحالة الرطبة



الشكل (4-18) الثابت التجريبي للعيينة الثانية

- تدل المخططات الثلاث السابقة أن العينتين تتقاربان في قيم الثابت التجريبي: 0.18 للعيينة الأولى - 0.22 للعيينة الثانية وهما متقاربان من قيمة الثابت التجريبي المفروضة وفق المراجع [34] و [35] وهي 0.2.

2-4-4 الحالة الجافة:

الحالة الأولى من الحالة الجافة:

نلاحظ من الشكل المرافق لحصيرة سيرينسكي أن هذا التمثيل في الحالة الجافة، يلغي الطور الرطب المتمثل بجسور الرطوبة بين الجزيئات ويلغي الطور الرطب المتمثل بالرطوبة المحيطة بالجزيئات، لنحصل على طورين فقط: الطور الغازي (المسام) المتمثل بالمساحات البيضاء والطور الصلب (جزيئات الاسمنت) المتمثل فقط بالمرجع الداكن بطول ضلع C، وتقسّم حينها المقاومات على النحو التالي:

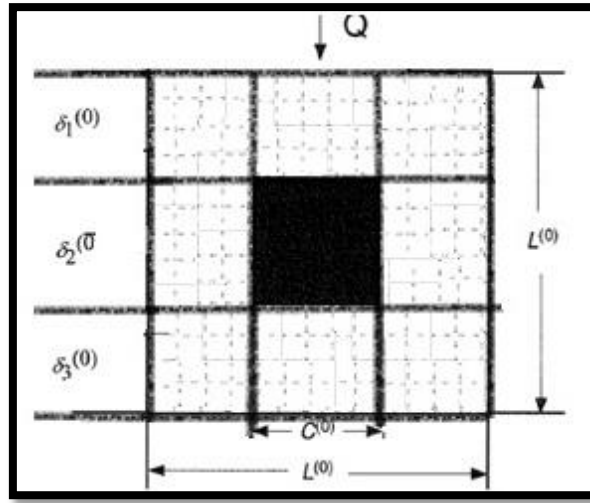
من أجل $\delta_1^{(0)}$:

$$\frac{1}{R_1^{(0)}} = \frac{L^{(0)} \cdot k_g}{\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}} \quad (66)$$

من أجل $\delta_2^{(0)}$:

$$\frac{1}{R_2^{(0)}} = 2 \frac{1}{R_{21(g)}^{(0)}} + \frac{1}{R_{22(w)}^{(0)}}$$

$$\frac{1}{R_2^{(0)}} = \frac{2k_g \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}}{C^{(0)}} + k_s \quad (67)$$



الشكل (4-19) حصيرة سيرينسكي في الحالة الجافة (غياب الطور الرطب) - الحالة الأولى من أجل $\delta_3^{(0)}$:

$$\frac{1}{R_3^{(0)}} = \frac{L^{(0)} \cdot k_g}{\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} R_1^{(0)} &= R_3^{(0)} \\ R_{sc,d}^{(0)} &= R_1^{(0)} + R_2^{(0)} + R_3^{(0)} \\ R_{sc}^{(0)} &= 2R_1^{(0)} + R_2^{(0)} \\ R_{sc,d}^{(0)} &= 2 \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2L^{(0)} \cdot k_g} + \frac{C^{(0)}}{k_g(L^{(0)} - C^{(0)}) + k_s C^{(0)}} \\ R_{sc,d}^{(0)} &= \frac{1}{k_g} \left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} + \frac{\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}}{\left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}\right) + \beta_{sg}^{(0)} \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}} \right) \\ k_{e,sc,d}^{+(0)} &= \frac{k_{e,sc}^{(0)}}{k_g} = \frac{L^{(0)}}{R_{sc}^{(0)} \cdot A^{(0)} \cdot k_g} \\ A^{(0)} &= L^{(0)} \times 1 \end{aligned}$$

$$k_{e,sc,d}^{+(0)} = \left\{ 1 - \left(\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \frac{\frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}}{\left(1 - \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}} \right) + \beta_{sg}^{(0)} \frac{C^{(0)}}{L^{(0)}}} \right\}^{-1} \quad (69)$$

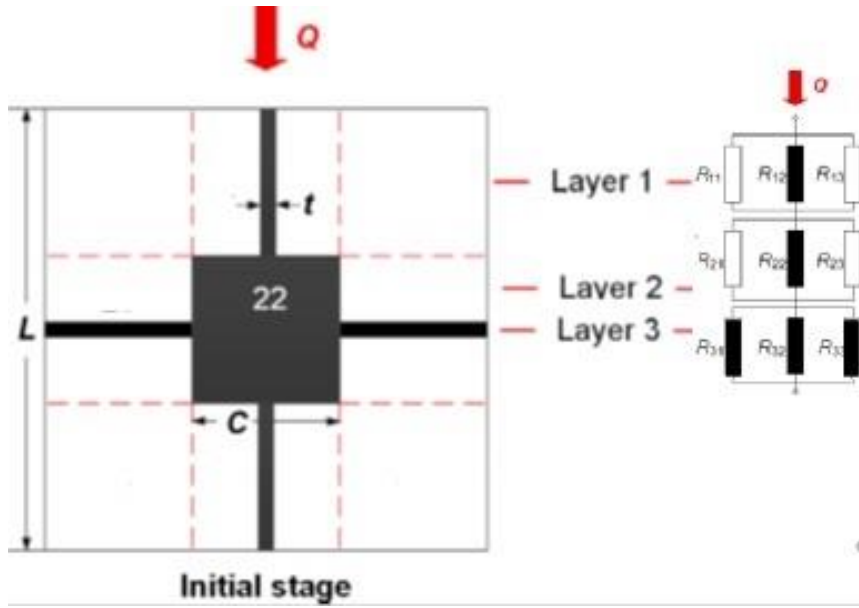
يمكن التوصل إلى المعادلة السابقة نفسها من المعادلة العامة لمعامل التوصيل الحراري الفعال اللابعدى (الحالة الرطبة)، بتعويض القيم $r^{(n)+}$ و $t^{(n)+}$ و $\beta_{wg}^{(n)}$ بالقيمة صفر نحصل على معامل التوصيل الحراري النظري اللابعدى في الحالة الجافة.

إن التمثيل السابق لحصيرة سيرينسكي يلغي وجود أي جسور تصل بين الجزيئات الصلبة في الحالة الجافة إذ لا يمكن أن تكون الجزيئات الصلبة منفصلة عن بعضها البعض في العينة، ولن يقود هذا التمثيل إلا لاختلاف كبير بين القيم النظرية والتجريبية ويعزى ذلك للأسباب التالية:

- في الحالة الرطبة، توجد جسور مائية بين الجزيئات وهذا يعني إيصالية حرارية أعلى لأن الإيصالية الحرارية للماء أعلى بـ3 مرات من المادة الصلبة.
- في الحالة الجافة، لا وجود للجسور المائية وبالتالي يقوم الهواء (نظرياً) بدور عازل يحيط بالمادة الصلبة مما يجعل الإيصالية الحرارية النظرية للمادة منخفضة، أما عملياً فهذا غير محقق حيث لا بد من وجود جسور من المادة الصلبة تصل الجزيئات ببعضها البعض وهذه الجسور ناقليتها أعلى بـ10 مرات تقريباً من الهواء مما يجعل من الإيصالية الحرارية التجريبية أعلى من المستنتجة نظرياً في الحالة الجافة.

الحالة الثانية من الحالة الجافة:

استبدل التمثيل السابق بالتمثيل التالي [35]، حيث تتصل الجزيئات مع بعضها البعض وفق جسور من المادة الصلبة.



الشكل (4-20) حصيرة سيرينسكي في الحالة الجافة (غياب الطور الرطب) - الحالة الثانية [35]

تقسم المقاومات الحرارية وفق هذا التمثيل، إلى ثلاث طبقات يمكن توزيعها وفق ما يلي:

$\delta 3$	$\delta 2$	$\delta 1$
$\frac{1}{R_{11}^{(0)}} = \frac{(L^{(0)} - t) k_g}{2} \cdot \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}$	$\frac{1}{R_{21}^{(0)}} = \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} \cdot \frac{C^{(0)} - t}{2} \cdot k_g$	$\frac{1}{R_{31}^{(0)}} = \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} \cdot \frac{C^{(0)}}{t} \cdot k_s$
$\frac{1}{R_{12}^{(0)}} = \frac{t \cdot k_s}{2} \cdot \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}$	$\frac{1}{R_{22}^{(0)}} = \frac{C^{(0)} \cdot k_s}{2} \cdot \frac{C^{(0)} - t}{2}$	$\frac{1}{R_{32}^{(0)}} = \frac{C^{(0)} \cdot k_s}{t}$
$\frac{1}{R_{13}^{(0)}} = \frac{(L^{(0)} - t) k_g}{2} \cdot \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}$	$\frac{1}{R_{23}^{(0)}} = \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} \cdot \frac{C^{(0)} - t}{2} \cdot k_g$	$\frac{1}{R_{33}^{(0)}} = \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} \cdot \frac{C^{(0)}}{t} \cdot k_s$
$R_1^{(0)} = \frac{1}{2} \left(\frac{(L^{(0)} - C^{(0)})}{(L^{(0)} - t) \cdot k_g} + \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2t \cdot k_s} \right)$	$R_2^{(0)} = \frac{1}{2} \left(\frac{(C^{(0)} - t)}{L^{(0)} - C^{(0)} \cdot k_g} + \frac{(C^{(0)} - t)}{2 \cdot C^{(0)} \cdot k_s} \right)$	$R_3^{(0)} = \frac{t}{C^{(0)} \cdot k_s} + \frac{1}{2} \left(\frac{t}{L^{(0)} - C^{(0)} \cdot k_s} \right)$

حيث أن:

$$R_{sc,d}^{(0)} = 2R_1^{(0)} + 2R_2^{(0)} + R_3^{(0)}$$

لنحصل على المعادلة النهائية التالية التي تمثل المقاومة الحرارية الإجمالية:

$$R_{sc,d}^{(0)} = \frac{1}{k_g} * \left\{ \left(\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{(L^{(0)} - t) + t * \beta_{sg}^{(0)}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{C^{(0)} - t}{(L^{(0)} - C^{(0)}) + C^{(0)} * \beta_{sg}^{(0)}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{t}{\beta_{sg}^{(0)} ((L^{(0)} - C^{(0)}) + C^{(0)})} \right) \right\} \quad (70)$$

ويكون معامل التوصيل الحراري اللابيدي:

$$k_{e,sc,d}^{+(0)} = \left\{ \left(\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{(L^{(0)} - t) + t * \beta_{sg}^{(0)}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{C^{(0)} - t}{(L^{(0)} - C^{(0)}) + C^{(0)} * \beta_{sg}^{(0)}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{t}{\beta_{sg}^{(0)} ((L^{(0)} - C^{(0)}) + C^{(0)})} \right) \right\}^{-1} \quad (71)$$

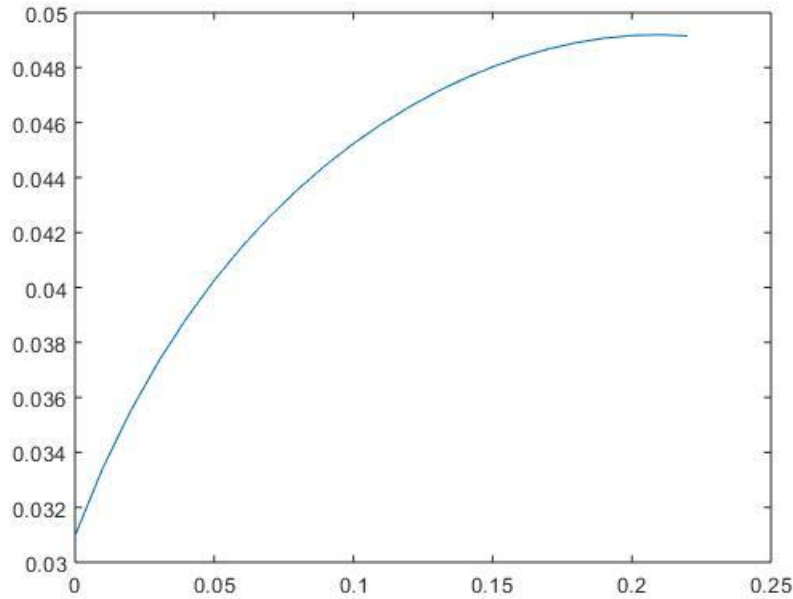
ومن أجل تكرار ل (n) مرة نكتب:

$$k_{e,sc,d}^{+(n)} = k_{e,sc,d}^{+(n-1)} \left\{ \left(\frac{L^{(n)} - C^{(n)}}{(L^{(n)} - t) + t * \beta_{sg}^{(n)}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{C^{(n)} - t}{(L^{(n)} - C^{(n)}) + C^{(n)} * \beta_{sg}^{(n)}} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{t}{\beta_{sg}^{(n)} ((L^{(n)} - C^{(n)}) + C^{(n)})} \right) \right\}^{-1} \quad (71)$$

$$\beta_{wg}^{(n)} = \frac{\beta_{wg}^{(0)}}{k_{e,sc}^{+(n-1)}}, \beta_{sg}^{(n)} = \frac{\beta_{sg}^{(0)}}{k_{e,sc}^{+(n-1)}} \text{ ويكون:}$$

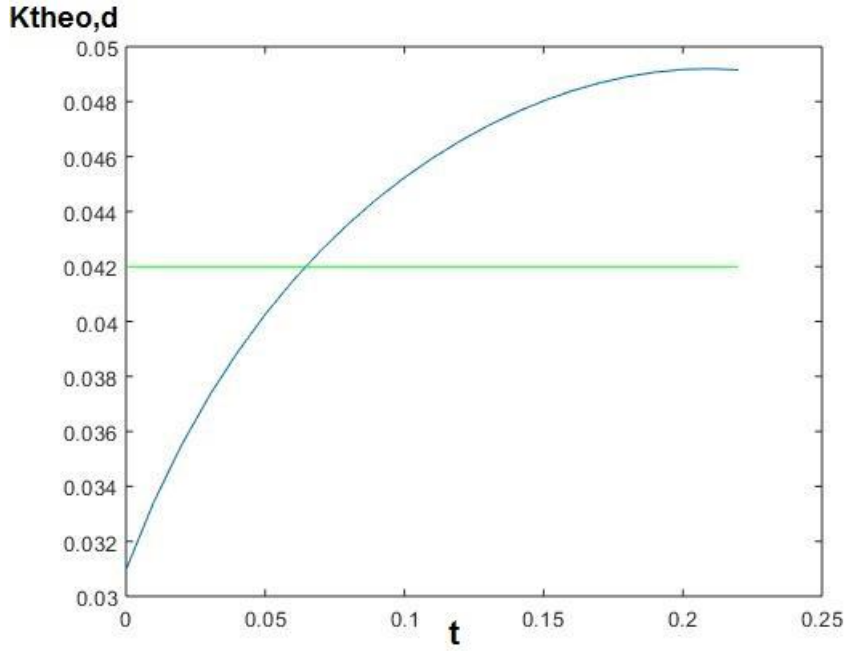
تم استخدام MATLAB لحل المعادلات السابقة مع الأخذ بعين الاعتبار أن معامل التوصيل الحراري المحسوب من البرنامج هو لا بعدي ومعامل التوصيل الحراري التجريبي الذي نحصل عليه من الجهاز هو بعدي، فإن حاصل جداء معامل التوصيل الحراري النظري المحسوب اللابيدي $k_{e,sc}^{+(n)}$ (من معادلة (71)) مع k_g يقود إلى معامل التوصيل الحراري النظري البعدي $k_{theo,d}$. تم رسم منحنى بياني يبين تغير قيمة معامل التوصيل الحراري النظري في الحالة الجافة $k_{theo,d}$ بتغير قيمة سماكة الجسر الصلب t حيث تتغير t من القيمة ($t=0$)

وهي حالة توافق عدم اتصال بين الجزيئات إلى القيمة $(t=C)$ وهي القيمة التي توافق انعدام المسام كما هو موضح بالشكل (21-4) من أجل العينة الأولى.



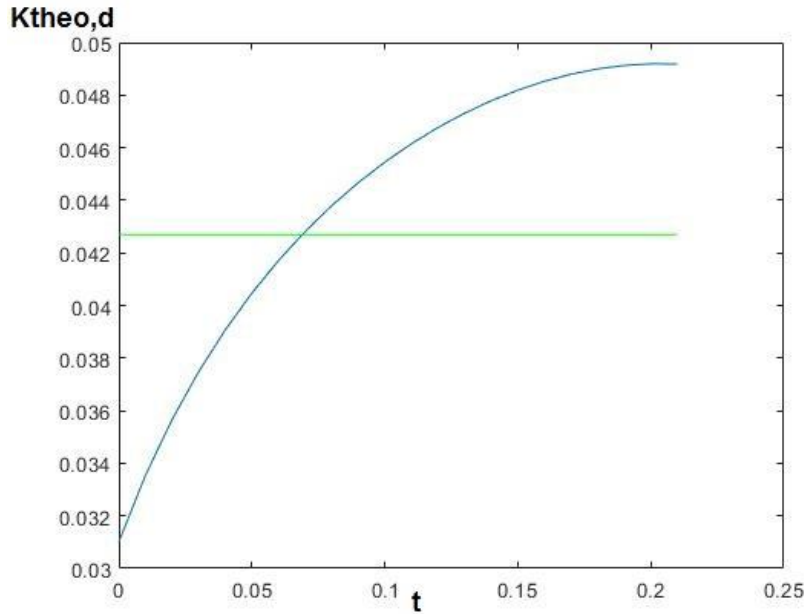
الشكل (21-4) تغير قيمة $k_{theo,d}$ مع t - الحالة الثانية- العينة الأولى

وبإسقاط قيمة معامل التوصيل الحراري التجريبي في الحالة الجافة التي تم الحصول عليها من الجهاز وهي $k_{exp,d} = 0.042 \frac{W}{mk}$ كما هو موضح بالشكل (22-4) على المنحني البياني، تكون قيمة t الموافقة هي 0.065 وهذا يوافق نسبةً إلى $C=0.2192$ ، الثلث تقريباً أي أن الجسور الصلبة التي تصل بين الجزيئات تشكل ثلث الجزيئات الصلبة نفسها وهو أمر يستحق لفت الانتباه، لأننا نحصل بهذا الشكل على مادة نرتفع فيها المقاومة الميكانيكية بزيادة حجم الجسور بين الجزيئات.



الشكل (22-4) اسقاط قيمة $k_{exp,d}$ على المنحني - العينة الأولى

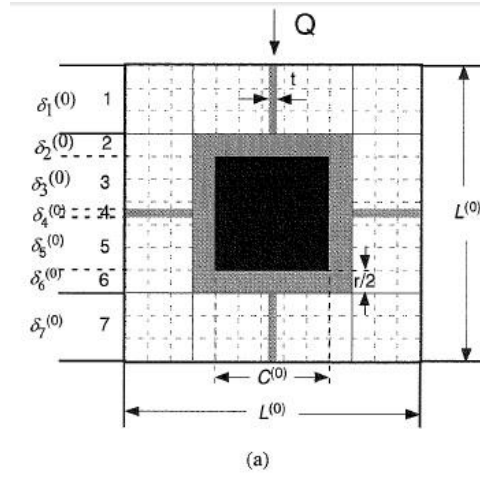
وبتكرار الأمر نفسه مع العينة الثانية، وبعد رسم المنحني لتغير t مع $k_{theo,d}$ واسقاط قيمة معامل التوصيل الحراري التجريبي في الحالة الجافة التي تم الحصول عليها من الجهاز وهي $k_{exp,d} = 0.0429 \frac{W}{mk}$ كما هو موضح بالشكل (23-4) نحصل على قيمة $t=0.075$ وبالنسبة إلى قيمة $C=0.2241$ الموافقة للعينة الثانية فإننا نلاحظ أن قيمة t هي بحدود ثلث C (بشكل مشابه للتفسير الفيزيائي السابق).



الشكل (23-4) اسقاط قيمة $k_{exp,d}$ على المنحني - العينة الثانية

3-4-4 حالة الإشباع الكامل بالرطوبة

لا يمكن اختبار معامل التوصيل الحراري للعينتين في حالة الإشباع الكامل بالرطوبة (حالة الغمر الكامل) لأنه بعد إزالة العينة من الماء، لا يمكن وضعها في جهاز الإيصالية الحرارية مباشرة، إذ أن الماء يمكن أن يؤثر على أداء المقاومات الكهربائية الموجودة ضمن الصندوق المعزول مما يسبب تلف الجهاز. لذلك يمكن استنتاج معامل التوصيل الحراري النظري فقط في حالة الإشباع الكامل بالرطوبة (الرطوبة تشغل كل المسام- الفراغات الهوائية) وهذا يعني عدم وجود جسور رطوبة تصل بين الجزيئات أو رطوبة محيطة بالجزيئات وإنما تمتد هذه الرطوبة لتشمل كافة مسام الوسط.



وبالعودة إلى الشكل السابق يكتب معامل التوصيل الحراري النظري في حالة الإشباع الكامل بالرطوبة بالشكل:

$$\frac{1}{R_1^{(0)}} = \frac{L^{(0)} \cdot k_w}{L^{(0)} - C^{(0)}}$$

$$\frac{1}{R_2^{(0)}} = \frac{2k_w \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}}{\frac{L^{(0)} + C^{(0)}}{2}} + \frac{k_s \cdot C^{(0)}}{\frac{L^{(0)} + C^{(0)}}{2}}$$

$$\frac{1}{R_3^{(0)}} = \frac{L^{(0)} \cdot k_w}{L^{(0)} - C^{(0)}}$$

$$R_{sc}^{(0)} = R_1^{(0)} + R_2^{(0)} + \dots + R_7^{(0)}$$

$$R^{(0)} = 2 \frac{\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}}{L^{(0)} \cdot k_w} + \frac{\frac{L^{(0)} + C^{(0)}}{2}}{2k_w \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} + k_s \cdot C^{(0)}} =$$

$$R^{(0)} = \frac{1}{k_g} \left\{ 2 \frac{\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}}{L^{(0)} \cdot \beta_{wg}^{(0)}} + \frac{\frac{L^{(0)} + C^{(0)}}{2}}{2\beta_{wg}^{(0)} \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} + \beta_{sg}^{(0)} \cdot C^{(0)}} \right\}$$

$$k_{e,sc}^{+(0)} = \frac{k_{e,sc}^{(0)}}{k_g} = \frac{L^{(0)}}{R_{sc}^{(0)} \cdot A^{(0)} \cdot k_g}$$

$$A^{(0)} = L^{(0)} \times 1$$

$A^{(0)}$ تمثل المساحة الكلية للمقطع العرضي الظاهر، ويكون معامل التوصيل الحراري اللابعدى في حالة

الإشباع الكامل برطوبة بالشكل:

$$k^{+(0)} = \left\{ 2 \frac{\frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2}}{L^{(0)} \cdot \beta_{wg}^{(0)}} + \frac{\frac{L^{(0)} + C^{(0)}}{2}}{2\beta_{wg}^{(0)} \frac{L^{(0)} - C^{(0)}}{2} + \beta_{sg}^{(0)} \cdot C^{(0)}} \right\}^{-1} \quad (72)$$

الفصل الخامس

الخلاصة والتوصيات

1-5 الخلاصة

تلخص الاستنتاجات في هذه الأطروحة بالشكل التالي:

المرحلة الأولى:

لم تفلح المحاولات المتكررة في تصنيع عينة أيروجيل من أساس غضاري، ولم يتم التوصل إلى تطبيق الغضار في البناء بشكل مباشر دون معالجة بسبب تأثير الرطوبة السيء عليه، كما أنه لا يجوز إضافة حمض الكبريت كعامل مولد للمسامية نظراً للآثار السلبية التي يلحقها بالإسمنت.

المرحلة الثانية:

1. تم إنتاج عينة إسمنتية خلوية (إسمنت مع مسحوق الألمنيوم) تصلح لأن تكون مادة عازلة، مع إضافة بعض المواد التي تغير من شروط التفاعل، وتم إنتاج سلسلتين كل سلسلة تحتوي التراكيب الكيميائية الثلاث التالية:

- سلسلة A وهي عينات إسمنتية مصنعة من الإسمنت واوكسيد الكالسيوم ومسحوق الألمنيوم.
- سلسلة B وهي عينات إسمنتية مصنعة من الإسمنت ومسحوق الألمنيوم فقط.
- سلسلة C وهي عينات إسمنتية مصنعة من الإسمنت ومسحوق الألمنيوم وكلوريد الصوديوم.

2. تم إجراء الاختبارات التالية على العينات السابقة:

- اختبار الإيصالية الحرارية وفق ASTM
- اختبار المقاومة الميكانيكية.
- اختبار معامل امتصاص الصوت.
- اختبار المسامية والكثافة الظاهرية ونسبة امتصاص العينة للماء، فكانت النتائج على النحو التالي:

- حققت A أفضل قيمة للمقاومة الميكانيكية 4.58Mpa، وأدنى قيمة لنسبة امتصاص

الماء 18.85%، وهذا يعني امتصاص للرطوبة أقل.

- حققت B أدنى قيمة لمعامل نفوذية الصوت 0.71 cm^{-1} ، نتيجة لمساميتها المرتفعة

68.9% وهذا يعني أنه يمكن تطبيقها كمادة عازلة للصوت.

- حققت C أدنى قيمة لمعامل التوصيل الحراري $0.192 \frac{\text{W}}{\text{m.K}}$ وهذا يعني أنه يمكن

تطبيقها كمادة عازلة حرارياً.

وتم استنتاج أنه يمكن استخدام العينة الأولى كمادة عازلة كونها جيدة المقاومة الميكانيكية وتخفض فيها

نسبة امتصاص الماء على حساب المسامية، فهي تشكل عازلاً للرطوبة، مع أنها تمتلك كثافة ظاهرية مرتفعة لكنها

تبقى ضمن الحدود المقبولة دون أن يؤثر ذلك بشكل كبير على الحمولة الإجمالية للمبنى.

المرحلة الثالثة:

1. كان الهدف من البحث اختبار نسبة تأثير NaCl على خواص العينة بتغيير نسب الملح المضافة منه كما يلي:

- للعينة (7): (79.5% إسمنت - 15% كربونات الكالسيوم - 5% ملح - 0.5% مسحوق الألمنيوم)
- للعينة (8): (74.5% إسمنت - 15% كربونات الكالسيوم - 10% ملح - 0.5% مسحوق الألمنيوم)
- للعينة (9): (69.5% إسمنت - 15% كربونات الكالسيوم - 15% ملح - 0.5% مسحوق الألمنيوم)

نستنتج هنا أنه يجب اضافة ملح كلوريد الصوديوم بنسب منخفضة لا تتجاوز 5% والتي توافق إيصالية حرارية منخفضة $0.114 \frac{W}{m.K}$ ومقاومة ميكانيكية عالية $5.38Mpa$.
الدراسة التحليلية:

- تم إجراء الدراسة التحليلية لعينتين إسمنتيتين مصنعين من نفس التركيب الكيميائي (إسمنت، مسحوق ألمنيوم، كلس الحي) لتحديد المسامية والكثافة الظاهرية ومعامل التوصيل الحراري في الحالة الجافة لنحصل على نتائج شبه متماثلة بين العينتين. تم ترطيب العينتين بدرجاتي رطوبة مختلفتين لنحصل على معاملي توصيل تجريبيين مختلفين باختلاف درجة الرطوبة.
 - تمت نمذجة البنية المسامية (الوسط المسامي) للمادة العازلة وبحل جملة مؤلفة من ثلاث معادلات مع ثلاث مجاهيل تم تحديد أبعاد البنية المسامية للعينة العازلة بطول جانبي $L=0.7902$ وطول ضلع المربعات المركزية $C=0.2192$ ورقم التكرار $n=4$.
1. في الحالة الرطبة: درست المقاومات الحرارية المطبقة في النمذجة، وتم تطبيق المعادلات الحاكمة لهذه المقاومات الحرارية في برنامج matlab، للحصول على معامل التوصيل الحراري النظري اللابعدى في الحالة الرطبة ثم تم تحويله إلى معامل التوصيل الحراري النظري البعدي بضربه بمعامل التوصيل الحراري للهواء، لنحصل على اختلاف بين معاملي التوصيل الحراري التجريبي والنظري في الحالة الرطبة من أجل العينة الأولى بحدود 2.66% والاختلاف في العينة الثانية 3.78%، وهو اختلاف بسيط.

2. في الحالة الرطبة: تم تحديد الثابت التجريبي لربط القيم النظرية مع التجريبية فكانت النتائج:

- للعينة (10): $\frac{S_{wsp}}{S_w} = cn_1 = 0.18$

$$\frac{S_{wsp}}{S_w} = cn_2 = 0.22: (11) \text{ للعينة } \bullet$$

3. في الحالة الجافة:

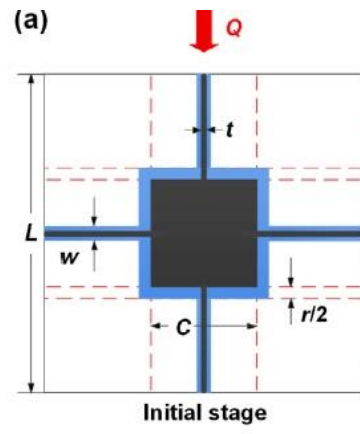
✓ بعد استنتاج معامل التوصيل الحراري في الحالة الجافة باعتماد التمثيل الذي يعتمد وجود جسور صلابة بين الجزيئات الصلبة، دُرس تغير سماكة t (سماكة الجسر الصلب) وتبين أنها تشكل ما يقارب 0.35 من القيمة C وفق قيم المسامية التجريبية الناتجة عن هذه المرحلة من الدراسة.

ختاماً: تم الحصول على عينة اسمنتية خلوية (خرسانة) من الاسمنت وكربونات الكالسيوم ومسحوق الألمنيوم وملح كلوريد الصوديوم (مواد خام محلية) وتمت معالجتها بأبسط الطرق والتجفيف بالوسائل التقليدية اعتماداً على شروط الوسط المحيط، وتم الحصول بالتالي على عينة يسهل تطبيقها ولا تحتاج إلى هدر في الطاقة خلال عملية التصنيع ويمكن استخدامها كمادة عازلة للحرارة والصوت.

2-5 التوصيات

تم التوجه في هذه الأطروحة إلى إلقاء الضوء على بعض أهم مواد العزل المطبقة في العالم العربي، وإجراء بعض الاختبارات عليها مع دراسة تأثير الرطوبة عليها. لقد اعترضت الأطروحة بعض المشاكل والتساؤلات التي نوصي بالعمل على تجاوزها كمجموعة من المقترحات في سبيل التوصل إلى أفضل النتائج على النحو التالي:

1. اعتماد وجود جسور من المادة الصلبة تصل بين جزيئات المادة الصلبة في حصىرة سيرينسكي (إضافة لجسور الرطوبة) وهذا الحل يقدم مصداقية أكبر وهذا يتطلب تحديد البعد w) كما هو موضح بالشكل (1-5).
2. استخدام تقنيات مناسبة لتحديد معامل التوصيل الحراري تجريبياً في حالة الإشباع الكامل للرطوبة دون أن يؤثر ذلك على عمل جهاز قياس الإيصالية الحرارية بشكل سلبي.
3. دراسة تأثير الملح المتبقي والتأكد من إزالته بشكل كامل أثناء عملية غسل العينات.
4. تصنيع عينات أيروجيل بتكاليف منخفضة.
5. محاكاة الوسط المسامي باستخدام أحد برامج المحاكاة الحاسوبية.
6. تطبيق استخدام الخرسانة الخلوية (المشبعة بالهواء) في القطر العربي السوري بشكل موسع، لاسيما أنها مطبقة بشكل واسع في بعض الدول العربية مثل مصر والعراق.
7. تطبيق وسائل معينة لدمج الغضار مع الإسمنت في الخرسانة الخلوية (إما بمعالجة الغضار، أو باستخدام مواد رابطة).



الشكل (1-5) البعد w

المراجع العلمية

Reference

- [1].K. A. Small and K. Dender. "**The Effect of Improved Fuel Economy on Vehicle Miles Traveled: Estimating the Rebound Effect Using U.S. State Data, 1966-2001**". *University of California Energy Institute: Policy & Economics* .September 2005.
- [2].Ali J. Hamad. (2014). "**Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review**". *International Journal of Materials Science and Engineering*. Vol. 2, No. 2.
- [3].Chaykovskiy German. (2010)."**Comparison of Thermal Insulation Materials for Building Envelopes of Multi-storey Buildings in Saint-Petersburg**". *Bachelor Thesis. Mikkely University of applied sciences*. 13-16.
- [4].Bergman et al. (2007). "**Fundamental of heat and mass transfer seventh edition**". *John Wiley & sons*. ISBN 13 978-0470-50197-9.
- [5].Y.A. Cengel. (2003). "**Heat and mass transfer: a practical approach, Second edition**". *McGraw- Hill*. ISBN 0072458933.
- [6]."**Thermal Insulation Handbook**". (2011). ASSOCIATION OF ARCHITECTURAL ALUMINIUM MANUFACTURERS OF SOUTH AFRICA. *Incorporating the Architectural Glass Industry*. (43).761–769.
- [7].قبيلي يامن علي.(2009). "ترشيد استهلاك الطاقة بتحسين بعض مواد العزل الحراري". دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم هندسة القوى الميكانيكية. كلية الهندسة الكهربائية والميكانيكية. جامعة تشرين. 10-21.
- [8].كعدان بكري.(2013). "معالجة الخامات الغضارية في الجمهورية العربية السورية". دراسة أعدت لنيل درجة الدكتوراه في قسم الكيمياء. كلية العلوم. جامعة حلب.
- [9].وتي عبد الله وآخرون.(1996). "الصناعات الكيميائية اللاعضوية". كلية العلوم. منشورات جامعة حلب.
- [10]. Dong-Yan Liu * and Chuan-Sheng Wu. (2012)."**Stockpiling and Comprehensive Utilization of Red Mud Research Progress**". *Materials*. Vol 5. 1232-1246.
- [11]. A.M. Neville. (2011). "**Properties of concrete - 5th ed.**" ISBN: 978-0-273-75580-7.p 92-104,275.
- [12]. الحصري ساطع. (1998). "مواد البناء واختباراتها". كلية الهندسة المدنية. منشورات جامعة حلب.

- [13]. Ruben Baetensa, Bjørn Petter Jelle, Arild Gustavsen. (2011). "**Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review**". *Energy and Buildings*. (43). 761–769.
- [14]. Farraj Al-Ajmi, Hany Abdalla, Magdi Abdelghaffar, Jamal Almatawah. (2016). "**Strength Behavior of Mud Brick in Building Construction**". *Open Journal of Civil Engineering*. Vol. 6, 482-494.
- [15]. N. Narayanan, K. Ramamurthy. (2000). "**Structure and properties of aerated concrete: a review**". *Cement & Concrete Composites*. 22. P 321-329.
- [16]. Ahmed Aidan, Zarook Shareefdeen, Bogdan Bogdanov, Irena Markovska, Dimitar Rusev, Yancho Hristov, Dimitar Georgiev. (2009). "**Preparation and properties of porous aerated concrete**". *Scientific Work Of The Russian University (НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ)*. Vol 48. Series 9.
- [17]. Karol Pietrak, Tomasz S. Wiśniewski. (2015). "**A review of models for effective thermal conductivity of composite materials**". *Journal of Power Technologies*. 95 (1). P14–24.
- [18]. Ramvir Singh, R.S. Bhoopal, Sajjan Kumar. (2011). "**Prediction of effective thermal conductivity of moist porous materials using artificial neural network approach**". *Building and Environment*. 46. 2603-2608.
- [19]. F. Tariku & M. K. Kumaran. (2006). "**Hygrothermal Modeling of Aerated Concrete Wall and Comparison with Field Experiment**". *3rd International Building Physics Conference, Montreal, QC., August 27, 2006*. pp. 321-328
- [20]. Yusuke Asakuma. (2013). "**Effective thermal conductivity of porous materials and composites as a function of fundamental structural parameters**". *Computer Assisted Methods in Engineering and Science*. 20. p89–98.
- [21]. She Wei, Yang Yonggan, Xie Deqing, and Zhang Yunsheng. (2014). "**Finite Volume Numerical Analysis of the Thermal Property of Cellular Concrete Based on Two and Three Dimensional X-ray Computerized Tomography Images**". *4th International Conference on the Durability of Concrete Structures 24–26 July 2014. Purdue University, West Lafayette, IN, USA*.
- [22]. Zuhtu Pehlivanli, Recep Calin and Ibrahim Uzun. (2010). "**Effect of Moisture and Temperature on Thermal Conductivity of G2/04 Class Autoclaved Aerated Concrete**". *Asian Journal of Chemistry*. Vol. 22, No. 5, 4104-4110.
- [23]. Soofia T. Elias-Ozkan, Francoise Summers, Nesen Surmeli and Simos Yannas. (2006). "**A Comparative Study of the Thermal Performance of Building Materials**". *The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*. 6-8 September 2006.

- [24]. Hanifi Binici, Orhan Aksogan, Mehmet Nuri Bodur, Erhan Akca, Selim Kapur (2006). **"Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials"**. *Construction and Building Materials*.p 1-4.
- [25]. S.R. Hostler, A.R. Abramson, M.D. Gawryla, S.A. Bandi, D.A. Schiraldi. (2009). **"Thermal conductivity of a clay-based aerogel"**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52 (2009) 665–669.
- [26]. Sughwan Kim, Jungki Seo, Junghoon Cha, Sumin Kim. (2013). **"Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel"**. *Construction and Building Materials*. 40. p 501-505.
- [27]. Nadia salim. Dhirar T. M. (2011). **"Production of High Performance Cellular Concrete"**. *AL- Taqani*.
- [28]. Michael W. Grutzeck, Maria DiCola. **"Zeolite Reinforced Autoclave Aerated Concrete (AAC)"**. *Research gate. The Pennsylvania State University, University Park*. P1-21.
- [29]. Michael Grutzeck, Stephen Kwan, Maria DiCola. (2004). **"Zeolite formation in alkali-activated cementitious systems"**. *Cement and Concrete Research*. June 2004.
- [30]. Hu`lya Kus, Thomas Carlsson. (2003). **"Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete"**. *Cement and Concrete Research*. 33. 1423–1432.
- [31]. P. O. Guglielmi, W. R. L. Silva, W. L. Repette, and D. Hotza. (2010). **"Porosity and Mechanical Strength of an Autoclaved Clayey Cellular Concrete"**. *Hindawi Publishing Corporation. Advances in Civil Engineering*. Volume 2010, Article ID 194102, 6 pages.
- [32]. Jianlong Kou, Fengmin W, Hangjun Lu, Yousheng Xu, Fuquan Song. (2009). **"The effective thermal conductivity of porous media based on statistical self-similarity"**. *Physics Letters*. A 374. 62–65.
- [33]. Jianlong Kou, Yang Liu, Fengmin Wu, Jintu Fan, Hangjun Lu, and Yousheng Xu (2009). **"Fractal analysis of effective thermal conductivity for three-phase (unsaturated) porous media"**. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*. 106, 054905.
- [34]. Hong-Qing Jin, Xiao-Li Yao, Li-Wu Fan Xu Xuc, Zi-Tao Yu. (2016). **"Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content"**. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 92. 589–602.
- [35]. Yongjin Feng, Peng Xu, Boming Yu, Peng Xu. (2007). **"A Generalized Model for the effective Thermal conductivity of unsaturated Porous Media Based on self-similarity"**. *Journal of Porous Media*.10 (6) .551-56.

- [36]. Shanshan Cai, Tengfei Cui, Boren Zheng, Pingfang Hu. (2017). "**A Fractal Approach to Calculate the Thermal Conductivity of Moist Soil**". *IGSHPA Technical/Research Conference and Expo*. Denver March 14-16.
- [37]. Yaqing Li, Greg Galecki , Gul Akar , Sezai Sen, Yutao Zhang. (2017). "**Application of the fractal theory for evaluating effects of coal comminution by waterjet**". *Int J Coal Sci Technol* .1(4):450–455.
- [38]. Hikmet. G., Sabit E., Buket Y., Mesut B., Nurullah A. (2011). "**A Soil Particle Size Distribution and Solid Fractal Dimension as Influenced by Pretreatments**". *JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCES*. 17, 217-229.
- [39]. N. Narayanan, K. Ramamurthy. (2000). "**Structure and properties of aerated concrete: a review**". *Cement & Concrete Composites*. 22. p 321-329.
- [40]. Ali Ismail, Hamed Mekky, Mohamed Saad Elmaghraby. (2014). "**Assessment and utilization of some Egyptian clay deposits for producing lightweight concrete**". *International Journal of Materials Science and Applications*. 3(3). p 81-82
- [41]. Abdullah Keyvani. (2014). "**Thermal Performance & Fire Resistance of Autoclaved Aerated Concrete Exposed Humidity Conditions**". *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Volume: 03, Issue: 03.
- [42]. Jaime Fernando Argudo. (2003). "**Evaluation and Synthesis of Experimental Data for Autoclaved Aerated Concrete**". *Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin of the Requirements for the Degree of Master of Science in Engineering*. p 1-7.
- [43]. Mavinkal K. Kumaran. (2006). "**A Thermal and Moisture Property Database for Common Building and Insulation Materials**". *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*. ASHRAE Transactions, Volume 112, Part 2.
- [44]. Halina Garbalińska, Magdalena Bochenek. (2014). "**The Deterioration of Strength and Thermal Properties Of Autoclaved Aerated Concrete As A Result Of Capillary Moisture**". *Technical Transactions Architecture*. 8-A. P 1-7.
- [45]. Mendes et al. (2001). "**Moisture Content Influence on Thermal Conductivity Of porous Building Materials**". *Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janiero, Brazil*. August 13-15.
- [46]. V. Kočí, et al. (2011). "**Computational and experimental characterization of building envelopes based on autoclaved aerated concrete**". *WIT Transactions on Engineering Sciences*. Volume 72.
- [47]. D.Gawin, et al. (2003). "**Effect of Moisture on Thermal Performance and Energy Efficiency of Buildings with Lightweight Concrete Walls**".

- Commercial Buildings: Technologies, Design, and Performance Analysis*. P3, 153-3,158.
- [48]. Z. SUCHORAB et al. (2011). "**Influence of Moisture on Heat Conductivity Coefficient of Aerated Concrete**". *ECOLOGICAL CHEMISTRY AND ENGINEERING S*. Vol. 18, No. 1.
- [49]. M. PRUTEANU and M. VASILACHE. (2013). "**Thermal Conductivity Determination for Autoclaved Aerated Concrete Elements Used In Enclosure Masonry Walls**". *BULETIN OF THE POLITICAL INSTITUTE IN IAȘI .Technical University in Iasi*.
- [50]. B.B. Mandelbrot. (1983). "**The Fractal Geometry of Nature**". *M. H. Freeman and Company*.
- [51]. D.L. Li et al. (2012). "**Measurement and modeling of the effective thermal conductivity for porous methane hydrate samples**". *Sci. Chin. Chem I* . 55 (2012) 373–379.
- [52]. K. Kadoya. (2013). "**Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase**". *J. Phys. Chem. Ref. Data* 14 (1985) 947–970.
- [53]. A.B. Abell.et al. (1999). "**Mercury intrusion porosimetry and image analysis of cement-based materials**". *J.Colloid Interface Sci*. Vol 211 .P39–44.
- [54]. J.F. Hunt.et al. (1999). "**Theoretical thermal conductivity equation for uniform density wood cells**". *Wood Fiber Sci*. Vol 40. P 167–180.
- [55]. أنس قرمو. (2016). "استخدام المواد المستهلكة في العزل الحراري". دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم هندسة الطاقة. كلية الهندسة الميكانيكية. جامعة حلب.
- [56]. عقاد نديم. (1991). "فيزياء الصوت". منشورات جامعة حلب.
- [57]. قاطرجي آلاء. (2017). "دراسة تجريبية لاستخدام المخلفات الصناعية الصلبة كمواد عازلة في التطبيقات الحرارية المختلفة". دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم هندسة الطاقة. كلية الهندسة الميكانيكية. جامعة حلب.

الأبحاث المنشورة Published Articles

[1]. برمدا ماجدة، حاج طالب عامر، كاخيا حسان، ماردللي روللي. (2017). "تحضير خرسانة عازلة واختبار الأداء الحراري والمسامية لها". مجلة بحوث جامعة حلب. سلسلة العلوم الهندسية (2). العدد (137).

[2]. برمدا ماجدة، حاج طالب عامر، كاخيا حسان، ماردللي روللي. (2018). "تمنجة الوسط المسامي لمادة عازلة". مجلة بحوث جامعة حلب. سلسلة العلوم الهندسية (2). العدد (139).

[3]. برمدا ماجدة، حاج طالب عامر، كاخيا حسان، ماردللي روللي. (2018). "دراسة تجريبية وحسابية لمعامل التوصيل الحراري لمادة عازلة". مجلة بحوث جامعة حلب. سلسلة العلوم الهندسية (2). العدد (140).

[4]. Barmada J., Haj Taleb A., Mardelly R. (2018). "**Preparation of insulating concrete and testing its thermal conductivity and porosity and mechanical resistance and modelling the porous medium of it**". *International Journal of Academic Scientific Research*. Volume 6, Issue 1. (February - March 2018), P 09-25.

جدول (4-16): يبين الخطوات المتبعة لحساب البعد الكسيري D(fractal dimension)

D(fractal dimension)		C			B		A							الوزن (%)	الوزن (gr)
$\ln(A*B)/\ln(C)$	$\ln(C)$	Ri/Rmax	$\ln(A*B)$	A*B	M(r>Ri)/Mt	3(Rmax/Ri)	Rmax/Ri	Rmax	M(r>Ri)	Ri(ave R1:R2)	R2	R1	2.00	العينة الأولى	
1.17	-2.15	0.12	2.51	12.36	0.02	629.74	8.57	150	1.96	17.50	10	25	1.96	1.9	
1.41	-1.46	0.23	2.05	7.80	0.10	78.72	4.29	150	9.91	35.00	25	45	7.95	7.7	
2.50	-1.02	0.36	2.55	12.84	0.60	21.43	2.78	150	59.90	54.00	45	63	49.98	48.4	
2.98	-0.61	0.54	1.82	6.15	0.99	6.23	1.84	150	98.63	81.50	63	100	38.73	37.5	
2.99	-0.29	0.75	0.86	2.37	1.00	2.37	1.33	150	99.83	112.50	100	125	1.21	1.17	
3.00	-0.09	0.92	0.26	1.30	1.00	1.30	1.09	150	100.00	137.50	125	150	0.17	0.16	
2.34													100.00	96.83	
D(fractal dimension)		C			B		A							الوزن (%)	الوزن (gr)
$\ln(A*B)/\ln(C)$	$\ln(C)$	Ri/Rmax	$\ln(A*B)$	A*B	M(r>Ri)/Mt	3(Rmax/Ri)	Rmax/Ri	Rmax	M(r>Ri)	Ri(ave R1:R2)	R2	R1	2.00	العينة الثانية	
1.45	-2.15	0.12	3.10	22.30	0.035	629.74	8.57	150	3.54	17.5	10	25	3.54	3.4	
1.47	-1.46	0.23	2.13	8.45	0.107	78.72	4.29	150	10.73	35	25	45	7.19	6.9	
2.48	-1.02	0.36	2.53	12.61	0.589	21.43	2.78	150	58.85	54	45	63	48.13	46.2	
2.94	-0.61	0.54	1.80	6.03	0.967	6.23	1.84	150	96.67	81.5	63	100	37.81	36.3	
2.99	-0.29	0.75	0.86	2.36	0.997	2.37	1.33	150	99.69	112.5	100	125	3.02	2.9	
3.00	-0.09	0.92	0.26	1.30	1.000	1.30	1.09	150	100.00	137.5	125	150	0.31	0.3	
2.38													100.00	96	

Abstract

As a result of the ongoing changes occurring in the construction methods, the need to find more effective ways to serve the growing urban movement with the provision of appropriate ways has appeared to fulfil the conditions for thermal comfort and the lowest costs. The idea of thermal insulation plays an important role in terms of adjustment of heating and air-conditioning systems in buildings, to save energy consumption and to reduce environmental pollution and heat emission, since the thermal insulation is an important subject adopted by most of the mechanical, civil, architectural and environmental engineering departments. This research serves all sectors, and supports the national economy by providing concrete material useful in the construction and thermal insulation, with low cost, easy application, help to get rid of some waste, and provide an alternative solution for heating and air conditioning costs in light of electricity rationing experienced by most sectors of the state.

In this research, most important thermal isolators are approached in classification, benefits, and methods of their application, supported by an illustration of the raw materials available in the Syrian Arab Republic are applicable as insulation and construction materials (clay and live lime...) in order to provide a brief on the insulating cement cell sample that will be manufactured in this research, and subjected to tests of mechanical resistance, thermal conductivity, and acoustic insulation and to determine its porosity and bulk density.

The experimental part (sample preparation and tests conducted on them) is divided into three stages: in the first stage aerogel samples are prepared from clay base, and then the clay is used as alternative to aerogel, until arriving to the insulating concrete with the proposal of an expansion factor of the new cement represented by sulfur acid, in addition to a review of the disadvantages of its application.

The second stage is the stage at which three series of samples are prepared in the following manner: The first sample is manufactured from cement, calcium oxide, aluminum powder, and the second sample is manufactured from cement and aluminum powder only and the third sample is manufactured from cement and aluminum powder and sodium chloride. The thermal conductivity coefficient ranged between 0.223-0.192 $\frac{W}{m.K}$ and mechanical resistance ranged between 0.72-4.58 MPa and the sound absorption factor between 0.14-0.269 cm^{-1} the porosity ranged between 22.1-68.9% and the virtual density between 587.1-1185.35 $\frac{Kg}{m^3}$ and water absorption rate 18.85-117.575%.

In the third stage, three identical samples were prepared with the same ratios of cement, aluminum powder and calcium oxide, and differ in the amount of added sodium chloride (5%, 10%, 15%). The results were: for the first sample the thermal conductivity coefficient 0.114 $\frac{W}{m.K}$, mechanical

resistance 5.38 MPa and for the second sample: thermal conductivity $0.166 \frac{W}{m.K}$, mechanical resistance 1.96 MPa and for the third sample: thermal conductivity coefficient $0.217 \frac{W}{m.K}$, mechanical resistance 1.37 MPa This means that sodium chloride salt ratios should not exceed 5%, which correspond to low thermal conductivity and high mechanical resistance.

In the analytical study:

Two samples of concrete were produced with same chemical composition (cement, powdered aluminum, live lime) and the same porosity approximately 70.5% and with different moisture saturation degree which are for the first sample 0.291 and for the second sample 0.313 therefore the experimental coefficient of thermal conductivity for the first sample $0.1246 \frac{W}{m.K}$ and for the second sample $0.1309 \frac{W}{m.K}$, (as the humidity increases, the thermal conduction increases).

Modeling of the porous medium of the insulating material was done using serpensky mat (fractal engineering), the insulating material was divided into unit cells of lateral length L and centered squares in the middle of side length C, and the fractal dimension was calculated using the volumetric granular distribution in order to study of the thermal resistances and deduce the value of the thermal conductivity theoretically using Matlab, as a result, the thermal conductivity coefficient in wet state for the sample first was $k_{theo,w} = 0.1281 \left(\frac{W}{m.K} \right)$. For the second sample $k_{theo,w} = 0.1361 \left(\frac{W}{m.K} \right)$. where the theoretical thermal conductivity coefficient in dry state was: for the first sample $k_{theo,d} = 0.0537 \left(\frac{W}{m.K} \right)$. For the second sample $k_{theo,d} = 0.0534 \left(\frac{W}{m.K} \right)$. the experimental thermal conductivity coefficient in dry state was: for the first sample $k_{exp,d} = 0.095 \left(\frac{W}{m.K} \right)$. For the second sample $k_{theo,d} = 0.0534 \left(\frac{W}{m.K} \right)$, For the sample second $k_{exp,d} = 0.097 \left(\frac{W}{m.K} \right)$. This means that the difference between the theoretical and experimental thermal conductivity in wet state was for the first 2.66% and for the second sample 3.78%, and it is a slight difference whereas the difference between the theoretical and experimental thermal conductivity in dry state was for the first 44.19% and for the second sample 46.8%, and this is a very big difference and the reason is explained in the conclusion chapter mentioned in end of the thesis.

All the above stressed the need of spreading the concrete insulation as a cheap material, can be applied in construction, simple in manufacturing, and easy to apply, taking into account the effect of adverse effect of moisture on the thermal conductivity of the material.