مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٢) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (2) 2026

مقارنة أنواع مختلفة من مواد مزيلة للرطوبة في عجلة التجفيف الدوارة في أنظمة التكييف.

د. عزيز رزق الحزوري*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١١/٣٠ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/١/٢٧)

□ ملخّص □

تهدف هذه الدراسة للمقارنة بين مواد مختلفة مزيلة للرطوبة في العجلات المجففة الدوارة المستخدمة في أنظمة تكييف الهواء، فقد تم تحضير مواد مركبة ذات أساس بوليميري مثل (PVA-AAc) و (silica gel-AAc) ومقارنة كفاءتها في إزالة الرطوبة مع السليكا جل المادة الأكثر استخداما في عجلات التجفيف الدوارة التجارية حول العالم.

أظهرت نتائج الدراسة أن المادة المركبة (silica gel-AAc) تمتلك أعلى معدل إزالة رطوبة عند درجات الرطوبة النسبية ودرجات حرارة الهواء المجدد المختلفة، تليها المادة المركبة (PVA-Acc) ثم الهيدروجل الصرف (silica gel)، كما أظهرت نتائج الدراسة أن عجلة التجفيف الدوارة التي تستخدم المواد المركبة الهيدروجلية مناسبة في أنظمة التكييف ضمن نطاق درجات الحرارة (40-120°C)، كما أن معدل إزالة الرطوبة (MR) يزداد بوتيرة عالية مع زيادة سرعة دوران عجلة التجفيف ضمن نطاق سرعات دوران (10-40rph) ومن ثم يستقر عند سرعات أعلى.

الكلمات المفتاحية: مادة مجففة، سيلكا جل، عجلة مزيلة للرطوبة، تكييف الهواء.

*دكتور– قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة– كلية الهندسة التقنية–جامعة طرطوس.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٢) ٢٠٢٦
Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (2) 2026

Comparison of different types of dehumidification materials in the rotary desiccant wheel in air conditioning systems

Dr. Eng. Aziz Al-Hazouri*

(Received 30/11/2025 . Accepted 27/1/2026)

□ ABSTRACT □

This study aims to compare different dehumidifying materials used in rotary desiccant wheels used in air conditioning systems. Polymer-based composite materials such as (PVA-silica gel) and (silica gel-AAc) were prepared and their dehumidification performance compared to silica gel (The most widely used material in commercial desiccant wheels worldwide).

The results of this study showed that (Silica gel-AAc) composite material had the highest moisture removal (MR) at different relative humidity levels and regeneration air temperatures. It was followed by (PVA-AAc) composite material and then the pure hydrogel (Silica gel). The results of the study also showed that the rotary desiccant wheel suitable in conditioning system in the temperature range(40-100°C). The moisture removal rate increases at a high rate with the increase of the rotating speed of desiccant wheel within the range(10-40rpm) and then level off at higher rotating speeds.

Keywords: Desiccant material, silica gel, air conditioning, rotary dehumidifier.

*Dr, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartrous University

1- مقدمة:

يتم بشـكل متزايد اسـتخدام عجلة التجفيف في أنظمة التكييف الحديثة بحيث يتم إزالة أكبر نسـبة من رطوبة الهواء مع أقل نسـبة انخفاض في الضـغط، بحيث يتم التحكم برطوبة الجو المحيط بدقة وتوفير أعلى مستوى من الارتياح للقاطنين في المباني التي يجري تكييفها باستخدام هذه الأنظمة [1].

توفر أنظمة التكييف الحديثة التي تعتمد على عجلة التجفيف الدوارة العديد من شـروط التكييف وأهمها [2]:

- تحسين نوعية الهواء داخل الأبنية والغرف المكيّفة.
- يتم الوصول لنقطة ندى منخفضة جداً.
- تسـتخدم هذه الأنظمة أنظمة الطاقة المتجددة لاسـيما المجمعات الشـمسـية في توليد الطاقة اللازمة لتشغيلها وهي طاقة نظيفة صديقة للبيئة خالية من الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري على عكس الأنظمة التقليدية.
- يمكن من خلالها التحكم الدقيق بدرجة حرارة ورطوبة الهواء.

وتسـتخدم عجلات التجفيف الدوارة بصـورة متزايدة فيما يسـمى بالأسـواق الصـناعية، إذ تتميز بمقاومتها للتآكل والصدأ بفعل العوامل الجوية وتستخدم في المنشآت الصناعية المختلفة مثل مستودعات التبريد، حلبات التزلج على الجليد، والمدارس، والمحال التجارية والمستشفيات، وغيرها.

وتتميز هذه الأنظمة بمسـتوى مرتفع من توفير الطاقة، وتتيح ضـبط دقيق لدرجة الحرارة، وتمنع تشـكل العفن والفطريات، وتخفض للحد الأدنى مستويات التعرق للقاطنين.

يتم استخدام السليكا جل كمادة مجففة ضمن عجلة التجفيف (desiccant wheel) في أنظمة التجفيف التقليدية، وتلعب المادة المجففة الدور الأكبر في كفاءة عمل العجلة المجففة، والتي تتبع مجموعة من العوامل مثل سرعة العجلة الدوارة ودرجة حرارة الهواء الداخل ورطوبته ودرجة حرارة هواء التجديد وسرعته، حيث أن فعاليتها في إزالة الرطوبة يحدد كفاءة نظام التكييف، وتتحدد فعالية المادة المجففة في نزع الرطوبة من خلال منحنيات الامتصاص عند درجة حرارة ثابتة، وهو مقياس قدرة المادة المجففة على امتزاز الرطوبة في ظل ظروف استاتيكية ثابتة [3].

يجب أن تتمتع المواد المزيلة للرطوبة بثلاث خصائص أساسية: ثبات جيد خلال دورات إزالة الرطوبة، وثبات حراري مرتفع، وامتزاز جيد لبخار الماء، وقد درس عدد كبير من الباحثين تأثير نوع المادة المجففة على أداء العجلة الدوارة المزيلة للرطوبة:

درس الباحث (Ge et al) [4] أداء السيلكا جل ولاحظ أنها مناسبة فقط عند درجة حرارة تجديد الهواء فوق (100°C) ورطوبة نسبية أعلى من (65%).

كما قام الباحث (Hussein et al) [5] بتصنيع مادة مركبة مزيلة للرطوبة من (MIL-101(Cr)/CaCl2) وقد أشارت نتائج دراسته بأن أداء هذه المادة كان أعلى بحوالي (11) مقارنة بالمادة الصرفة (MIL-101(Cr)).

كما قارن (Behede et al) [6] بين أداء عجلتين مزيلتين للرطوبة الأولى تستخدم مادة السيلكا جل التقليدية والثانية تستخدم مادة مركبة من السيلكا جل وكلوريد الكالسيوم بنسبة وزنية (3:2) وقد استخدمت قنوات على شكل مقطع مثلث ضمن العجلة وضعت فيها المادة المجففة، وقد بينت نتائج الدراسة أن سعة إزالة الرطوبة(dehumidification capability) في العجلة التي تستخدم المادة المركبة أعلى بحوالي (25%)مقارنة بالعجلة التي تستخدم السيلكا جل وحدها، كما انخفضت الرطوبة النوعية بشكل أكبر بمعدل(35%) باستخدام المادة المركبة، ووصل التحسين بمعامل الأداء إلى (40%) بما يثبت فعالية المواد المركبة في أنظمة التكييف التي تستخدم العجلة الدوارة.

٢- أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث في إمكانية تحسين أداء نظام تكييف الهواء بالدولاب المجفف وذلك باستخدام مواد هيدروجلية هجينة تم تحضيرها في المخبر، وهي ذات مواصفات جيدة من ناحية قدرتها على امتصاص بخار الماء مقارنة بالمواد التقليدية المزيلة للرطوبة

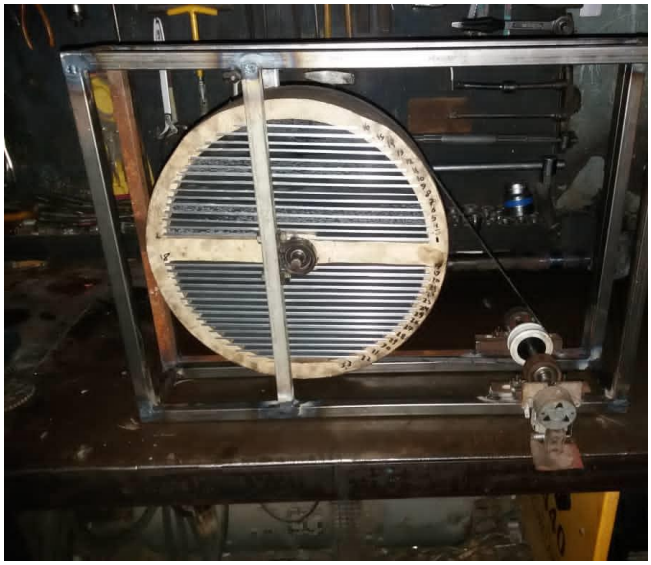
تهدف هذه الدراسة في المقام الأول إلى مقارنة كفاءة وفعالية مواد مجففة هيدروجيلية مثل (PVA-AAc)

و (silica gel-AAc) في إزالة الرطوبة مع السليكا جل المادة الأكثر استخداما في عجلات التجفيف الدوارة.

٣- المواد والطرائق:

٣-1- العجلة الدوارة:

تم استخدام العجلة الدوارة المصممة الموضحة بالشكل (1) وفق الأبعاد الموضحة بالجدول (1)



الشكل (1) العجلة المجففة الدوارة المستخدمة

بينما يوضح الجدول (1) مواصفات العجلة المجففة الدوارة المستخدمة:

الجدول(1) أبعاد العجلة الدوارة المجففة المستخدمة

البارامتر	قيمة البارامتر
القطر (D) بـ(cm)	40
نسبة قطاع العملية إلى قطاع التجديد	0.86
سماكة جدران القنوات(δ)(mm)	0.3
ارتفاع مقطع الجريان(mm)	2
النسبة الحجمية للمادة المجففة(φ)	0.8

٣-2- المواد المستخدمة:

استخدمت أنواع مختلفة من المواد المجففة في عجلة التجفيف الدوارة مزودة من شركة Loba Chemie Pvt. Ltd. في مومباي بالهند كما هو موضح في الجدول (٢):

الجدول (٢) المواد المركبة المجففة المستخدمة في العجلة الدوارة

نوع المادة	مواصفات المادّة
البولي فينيل الكحولي(PVA)	درجة البلمرة: (1700-1800) الوزن الجزيئي(Mn):1.15.000 درجة الحلمهة(mol%):98-99 اللزوجة: (32) سنتي بواز.
السيليكا جل	الكثافة الظاهرية: 70g/100ml حجم المسام:60A حجم الجسيمات:(40-63µm)
حمض الأكريليك (AAc)	درجة النقاء:99% الكثافة عند الدرجتين (20C°/4C°):1.049/1.051
البولي إيتيلين غليكول(PEG)	الوزن الجزيئي(Mw): 4000 قيمة الهيدروكسيل (Hydroxyl Value): 30-36 دليل شوارد الهيدروجين(pH) لمحلوله المائي:4.5-7.5

الخواص الفيزيائية والحرارية للمواد المجففة الصلبة المستخدمة

المادة المجففة	السعة الحرارية C_{Pad} (KJ/Kg.K)	عامل التوصيل الحراري K_d (W/m.K)	الكثافة ρ_{ad} (Kg/m^3)	سعة إزالة الرطوبة W_{max} (Kg/Kg)	كمية الحرارة q_{ads} (KJ/Kg)	المسامية ε
سيلكا جل	0.92	0.2	793	0.42	230	0.5
PVA-PEG	0.86	0.4		0.51	280	0.1
Silica gel-PAAc		0.6		0.6	295	0.8

3-3- تحضير المواد المجففة:

تم حل(5g) من البولي فنيل الكحولي (PVA) و5g من PEG في (100mL) من الماء المقطر من خلال التحريك بالمازج الحراري الموضح بالشكل (2) عند درجة الحرارة (90°C) وبسرعة دوران (200rpm) لمدة (4) ساعات، وبعد ذلك تم صب المزيج الناتج على لوح زجاجي وترك ضمن المجفف عند درجة الحرارة(60°C) حتى تبخر المذيب وتمام التصلب كما في الشكل (3).

الشكل (2) المازج الحراري المستخدم

الشكل (3) صب المزيج على لوح زجاجي

من ثم يتم وضع الصفائح المتصلبة الناتجة ضمن جهاز التشعيع الضوئي وهو عبارة عن حجرة من الخشب مغلفة من الداخل برقائق من الألمنيوم تحتوي على ستة مصابيح زئبقية، وتركها لمدة ساعتين بحيث تحدث عملية التشابك الجزيئي للبوليميرات (PVA) ويتحول لهيدروجل غير ذواب في الماء.

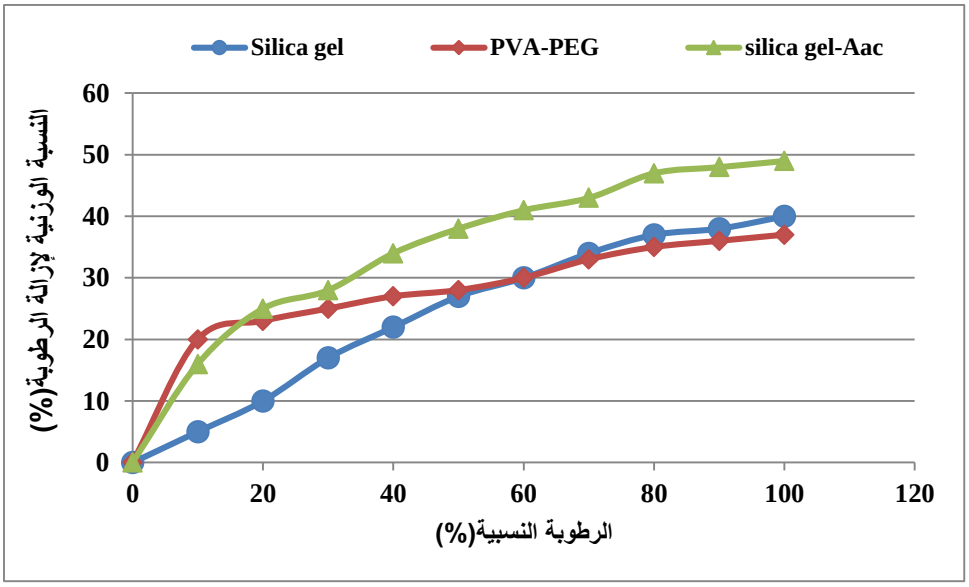
بينما يتم تشكيل الهيدروجلّ(سليكا جلّ- حمض الأكريليك) من خلال إضافة 10g من حبيبات السيلكا جل إلى (30mL) من حمض الأكريليك وتعريضه للتشعيع حيث يتبلمر حمض الأكريليك إلى البولي أكريليك أسيد (PAAc) ويتصلب مشكلاً هيدروجل غير ذواب في الماء.

يتم تقطيع الهيدروجلّات الناتجة بأبعاد (4×4mm) كمادة مجففة، ووضعها ضمن القنوات المخصصة لها في العجلة الدوارة لإجراء الاختبارات عليها ودراسة فعاليتها في إزالة الرطوبة وتكييف الهواء الداخل، ويتم قياس الرطوبة ودرجة الحرارة باستخدام حساسات نوع (DHT22) وضعت على مدخل ومخرج عجلة التجفيف الدوارة. وتم قياس النسب الوزنية للرطوبة باستخدام المخطط البسايكومتري عند مدخل ومخرج العجلة الدوارة.

٤-النتائج والمناقشة:

٤-1- فعالية الدولاب المجفف في إزالة الرطوبة:

يلاحظ من خلال الشكل (4) أن منحني إزالة الرطوبة للسيلكا جل خطي تقريباً، ويزداد معدل إزالة الرطوبة بشكل واضح مع ازدياد الرطوبة النسبية للهواء الداخل، وعلى النقيض من ذلك تبدي (PVA-PEG) سعة تجفيف عالية عند رطوبة نسبية أخفض (حتى 12%)، ومع ازدياد (RH%) تقترب سعة التجفيف من قيمة ثابتة تقريباً. نلاحظ أيضاً أن المادة المركبة (silica gel-AAc) تمتلك أعلى معدل إزالة رطوبة بالنسبة لبقية المواد المستخدمة ضمن المجال المدروس.

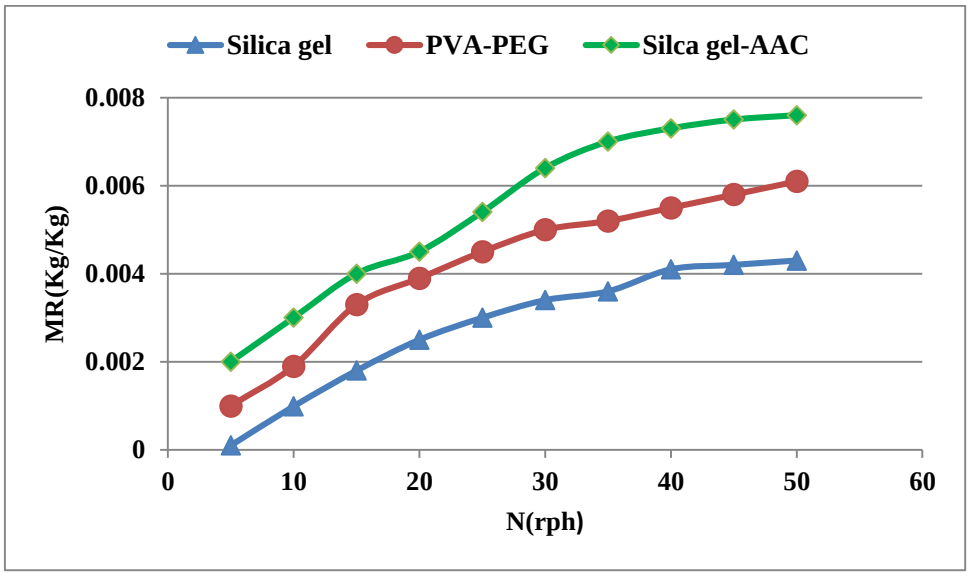


الشكل (4) فعالية العجلة الدوارة في إزالة الرطوبة كتابع لنسبة رطوبة الهواء الداخل

وبالتالي يوصى باستخدام الدولاب المجفف الذي يحتوي (SG) فقط عند رطوبة نسبية (RH%) داخلة عالية (أعلى من 60%)، أما المادة المركبة (silica gel-AAc) فقد أظهرت أداء جيد لناحية معدل إزالة الرطوبة بالمقارنة مع بقية المواد المستخدمة عند نفس شروط هواء الإمداد الداخل.

٤-2- تأثير سرعة دوران العجلة المجففة:

يوضح الشكل (5) معدل إزالة رطوبة الهواء الداخل إلى العجلة الدوارة كتابع لسرعة دوران العجلة الدوارة، وكما يلاحظ من الشكل بأنه مع زيادة سرعة دوران العجلة إلى (40rph) يتم الحصول على أعلى معدل إزالة للرطوبة:



الشكل (5) معدل إزالة الرطوبة كتابع لسرعة دوران العجلة المجففة الدوارة

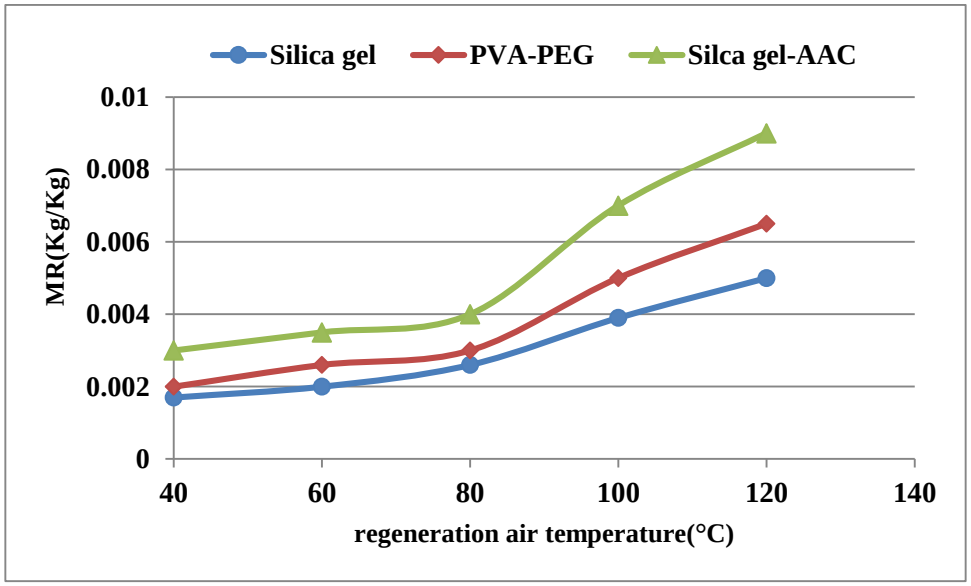
كما يتبين من خلال الشكل أن المادة المركبة (silica gel- AAc) هي الأكثر كفاءة في امتصاص الرطوبة،

وخاصة عندما تتجاوز السرعة 30rph وحتى 40rph ويرجع ذلك للبنية الشبكية للهيدروجل الناتج وهي شبكة ثلاثية الابعاد ناتجة عن تفاعلات تشابك السلاسل البوليميرية المستحث إشعاعياً (UV)، وفق ميكانيزم الجذور الحرة الناتجة عن انتزاع ذرات الهيدروجين من السلاسل، والتي تتميز بسعة امتزاز رطوبة مرتفع، وقدرتها على العودة العكسية إلى الحجم الطبيعي بعد امتصاصها للرطوبة وانتباجها (زيادة حجم الهيدروجل) ومن ثم تجفيفها، لتبدأ دورة امتصاص جديدة.

بعدها يبدأ معدل إزالة الرطوبة بالانخفاض ويرجع ذلك إلى أن زيادة السرعة فوق (40rph) يؤدي إلى اختلال التوازن بين معدل سرعة الهواء وسطح المادة المجففة، بحيث أن السرعة تكون عالية بالتالي المادة المجففة لا يتوافر لها الوقت الكافي لامتزاز بخار الماء الموجود في الهواء. تتوافق نتائج الدراسة مع ما توصل له الباحث (Ali Pour) والذي تبين بنتيجة دراسته ازدياد معدل إزالة الرطوبة مع زيادة سرعة العجلة الدوارة، لكن عند نطاق سرعات مختلف (3-12rpm) .

4-3- تأثير درجة حرارة الهواء على معدل إزالة الرطوبة:

يلاحظ من خلال الشكل زيادة (MR) مع زيادة درجة حرارة تجديد الهواء من (40-120°C) كما يتبين من خلال الشكل (6) أن معدل إزالة الرطوبة هي الأعلى في الهيدروجل (silica gel-AAC).



الشكل (6) معدل إزالة الرطوبة كتابع لدرجة حرارة هواء التجديد

ويتبين من خلال الشكل أن لدرجات الحرارة المنخفضة ضمن المجال (40-80°C) تأثير طفيف على معدل إزالة الرطوبة (MR) إذ تبقى قيمتها ثابتة تقريباً ضمن هذا المجال. تتوافق هذه النتائج مع ما توصل له الباحث (Hau et al) [7] والذي لاحظ من خلال دراسته أن أعلى معدل لإزالة الرطوبة للعجلة الدوارة كان

باســـتخدام مادة مركبة هيدروجلية (10wt%Polyacrylic acid + 10wt% poly(Silica gel-AAc) (acrylic sodium)+80wt% silica gel) حيث وصـــل معدل الإزالة إلى (0.007Kg/Kg) عند درجة حرارة هواء مجدد (50°C).

٥-الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

١- تم تحضـــير مواد مختلفة مزيلة للرطوبة من مواد بوليميرية هيدروفيلية ومن مزيج منها وتعريضها للأشعة (UV) للحصول على هيدروجلات مزيلة للرطوبة.

٢- تم الحصـــول على أعلى معدل لإزالة الرطوبة باســـتخدام المادة المجففة الهجينة (SilicaGel-AAC) بالنسبة للمواد الأخرى المستخدمة عند مختلف قيم الرطوبة النسبية الداخلة.

٣- أظهرت نتائج الدراســة أن عجلة التجفيف الدوارة التي تســتخدم المواد المركبة الهيدروجلية مناسـبة في أنظمة التكييف ضـمن نطاق درجات الحرارة (40-120°C) حيث بلغ أعلى معدل لإزالة الرطوبة عند درجات حرارة تجديد (80-120°C) باستخدام المادة المجففة الهجينة (SilicaGel-AAC).

٤- يزداد معدل إزالة الرطوبة (MR) بوتيرة عالية مع زيادة سرعة دوران عجلة التجفيف ضمن نطاق سرعات دوران(10-40rph) ومن ثم يستقر عند سرعات أعلى.

التوصيات:

١- دراسة فعالية مواد مجففة أخرى غير السيليكا جلّ مثل المواد النانوية.

٢- أظهرت المادة المركبة (silica gel-AAc) أداء جيد في إزالة الرطوبة لذلك نوصـــي باستخدامها، أما المادة (SG) يوصـى باستخدامها في الدولاب المجفف فقط عند رطوبة نسبية (RH%) داخلة عالية (أعلى من 60%)،

٣- دراســـة تأثير بارامترات أخرى على أداء الدولاب المجفف كمعدل تدفق هواء العملية والتجديد، ونسبة توفير الطاقة مقارنة بالأنظمة التقليدية.

٤- أمثلة شروط التكييف عن طريق نمذجة رياضية لبارامترات التشغيل بهدف الوصول لأعلى أداء للدولاب.

٦-المراجع:

[1] Cuce,P., Yilmaz, Y "A comprehensive review on rotary desiccant wheel systems: the future of smart building climate control"., Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2025) 150:9827–9850., https://doi.org/10.1007/s10973-025-14362-x

[2] Asim N, Amin MH, Alghoul MA, Badiei M, Mohammad M, Gasaymeh SS, et al. Key factors of desiccant-based cooling systems: Materials. Appl Therm Eng 2019;159:113946. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113946.

[3] Chen CH, Hsu CY, Chen CC, Chen SL. Silica gel polymer composite desiccants for air conditioning systems. Energy Build 2015;101:122–32. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.20 15.05.009.

[4] Ge,T., Qi,D., Dai,Y., experimental testing on contaminant and moisture removal performance of silica gel desiccant wheel(2018)Energy and Building176.doi: 10.1016/j.enbuild.2018.07.033.

[5] Hussein, Eman ; Al-Dadah, Raya ; Mahmoud, Saad Mahmoud et al. / Adsorption cooling system employing novel MIL-101(Cr)/CaCl2 composites : numerical study. In: International Journal of Refrigeration. 2019 ; Vol. 107. pp. 246–261.

[6]Behede, B., Chakrabati., Wankhede, U., Development of rotary dehumidifier whith silica gel based composite desiccant., Thermal scienc28(174-180)January 2024).

[7] Ali pour, Hossein., S.Mojtaba Hosseini, Experimental Study Of Desiccant Dehumidifier System With Focus On Wheel Base Material, Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST) ISSN: 2458-9403 Vol. 10 Issue 4, April - 2023

[8] Hau, C., Yeh,H.,Ching,C.,Silica gel/polymer composite desiccant wheel combined with heat pump for air conditioning system" (2016)Energy,vol84.pages87-99