international DESIGN JOURNAL
Print ISSN 2090-9632
Online ISSN 2090-9640

تطبيقات تكنولوجيا النانو لتحسين الأداء الوظيفي للملابس المستدامة

Nanotechnology Applications to Improve the Functional Performance of Sustainable Garments

طارق محمد زغلول
أستاذ مساعد بقسم الملابس الجاهزة، كلية الفنون التطبيقية، جامعة دمياط، دمياط، مصر tarekzaghlol@yahoo.com
أميرة عادل النوساني
مدرس مساعد بقسم الملابس الجاهزة، كلية الفنون التطبيقية، جامعة دمياط، دمياط، مصر amiraadel808@gmail.com
نجلاء محمد طعيمه
أستاذ تصميم الملابس بقسم الملابس الجاهزة، كلية الفنون التطبيقية، جامعة دمياط، دمياط، مصر naglaateama1@yahoo.com

ملخص البحث

أصبحت تكنولوجيا النانو واحدة من أهم مجالات البحث. وتحمل تكنولوجيا النانو مستقبلًا واعدًا للغاية للملابس. والتطوير في التجهيزات الوظيفية المعتمدة على تكنولوجيا النانو له إمكانيات لا حصر لها. حيث تُستخدم تقنية النانو في الملابس لتعزيز خصائص النسيج والراحة والوظيفة والاستدامة. وتستخدم المواد النانوية في الوقت الحاضر بشكل متزايد في تطبيقات مختلفة تتراوح من الرياضة والرعاية الصحية إلى الفضاء الجوي والأزياء. توفر المواد النانوية، مثل الجسيمات النانوية والألياف النانوية والمركبات النانوية المدمجة في الملابس، تحسينات ملحوظة في جودة المنتجات الملبسية. حيث أدت الخصائص الفريدة لتكنولوجيا النانو إلى توسعها السريع في صناعة الملابس. وساهمت في إنتاج ملابس عالية الأداء ومستدامة. حيث تم استخدام تقنية النانو لنقل العديد من الخصائص المرغوبة إلى الملابس مثل مضادات البكتيريا، ومقاومة الماء، والتنظيف الذاتي، ومقاومة التجعد، وغيرها من التطبيقات.

وتهدف هذه الدراسة إلى الوصول لطرق الاستفادة من تقنية النانو تكنولوجي في تحسين الأداء الوظيفي للملابس وجعلها أكثر استدامة.

وتوصلت الدراسة إلى أن تكنولوجيا النانو في مجال الملابس وتطبيقاتها المتنوعة توضح الإمكانات الهائلة للمواد النانوية في تعزيز الخصائص الوظيفية للأقمشة والملابس. وان استخدام المواد الطبيعية في تجهيز الملابس النانوية يعزز الصداقة البيئية، وهو بعد مهم من ابعاد الاستدامة.

والتحسن الملحوظ في الخصائص يجعل التجهيزات النانوية للملابس أكثر قابلية للتطبيق من الجانب الاقتصادي، وهو بعد اخر من ابعاد الاستدامة.

وباستكشاف الإمكانات الهائلة لتكنولوجيا النانو لتعزيز خصائص الملابس واستدامته، يمكن أن تكون بمثابة مصدر قيم للباحثين وإلهام للمزيد من البحث والابتكار والتطوير المستقبلي للمنتجات النسيجية المتقدمة.

كلمات دالة

تكنولوجيا النانو
Nanotechnology
الاستدامة
Sustainability
الأداء الوظيفي
Functional Performance
الملابس المستدامة
Sustainable Clothing

Paper received October 22, 2024, Accepted December 26, 2024, Published on line March 1, 2025

المقدمة Introduction

لقد أحدثت تكنولوجيا النانو ثورة في العديد من الصناعات، وصناعة النسيج والملابس خاصة. حيث أدي دمج تكنولوجيا النانو في الملابس إلي فتح عددًا كبيرًا من الفرص لتحسين خصائص الأقمشة واستدامتها. في الوقت الحاضر، تعتبر الخصائص الوظيفية والراحة في نسيج الملابس من أهم الميزات التي يبحث عنها مرتديها. ويتم تطوير مجموعة متنوعة من تقنيات الملابس لتلبية احتياجات العملاء. وفي السنوات الأخيرة، أصبحت تكنولوجيا النانو واحدة من أهم مجالات البحث، حيث أدت الخصائص الفريدة لتكنولوجيا النانو إلى توسعها السريع في صناعة الملابس. وساهمت في إنتاج المنسوجات عالية الأداء. (Prasad, et al.,2024)

حيث تتمتع المواد النانوية بالقدرة على إحداث تحول في صناعة الملابس من خلال نقل خصائص متعددة الوظائف مثل التنظيف الذاتي والحماية من الأشعة فوق البنفسجية ومقاومة التجعد للمنسوجات دون المساس بالخصائص الاصلية للخامات.

تُستخدم المواد النانوية بكميات ضخمة في قطاع النسيج والملابس وذلك لتحسين خواص الأقمشة او إكسابها خواص ووظائف غير عادية، حيث تعطي الأقمشة المستدامة الأولوية للممارسات الصديقة للبيئة، مما يقلل بشكل كبير من متطلبات الصناعة والآثار البيئية. (داليا عبد الحفيظ واخرون، 2020)

وتعتبر مواد النانو من أروع المواد في القرن الحادي والعشرين. التي جذبت الاهتمام بسبب خصائصها الفيزيائية والبيولوجية والكيميائية الفريدة التي تتغير بشكل جذري على المستويات الجزيئية والذرية. (Riaz, et al., 2018)

فالبحث الحالي يُعنى بدراسة واستكشاف تطبيقات تكنولوجيا النانو في صناعة الملابس المستدامة.

مشكلة البحث Statement of the Problem

تتلخص مشكلة البحث في طرح التساؤلات التالية:

- ما إمكانية إنتاج ملابس مستدامة بتقنية النانو تكنولوجي؟
- كيف يمكن الاستفادة من تكنولوجيا النانو لتحسين الأداء الوظيفي للأقمشة وجعلها أكثر استدامة؟

أهمية البحث: Research Significance

- إلقاء الضوء على طرق تحسين الأداء الوظيفي للملابس باستخدام النانو تكنولوجي.
- معرفة أهمية تطبيقات النانو تكنولوجي في مجال الملابس المستدامة.

CITATION Tariq Zagloul, et al (2025), Nanotechnology Applications to Improve the Functional Performance of Sustainable Garments, International Design Journal, Vol. 15 No. 2, (March 2025) pp 93-103

أهداف البحث: **Research Objectives**

- دراسة خصائص وتطبيقات تكنولوجيا النانو في مجال الملابس.
- إنتاج ملابس بأقمشة تحفز التقدم نحو مستقبل أفضل وأكثر استدامة.

فروض البحث: **Research Hypothesis**

يفترض البحث إمكانية تحسين خصائص الاقمشة باستخدام النانو والحصول علي ملابس مستدامة.

حدود البحث: **Research Delimitations**

يقتصر البحث الحالي على تطبيقات تقنيات النانو تكنولوجي في مجال الملابس المستدامة.

منهج البحث: **Research Methodology**

يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي.

الإطار النظري: **Theoretical Framework**

2-1- النانو تكنولوجي:

إن دمج تكنولوجيا النانو في المنسوجات يحمل أهمية كبيرة نظرا لقدرته على إحداث ثورة في صناعة النسيج. تُستخدم الجسيمات النانوية الهندسية ذات الخصائص السطحية المتغيرة في صناعة النسيج. ومن الأمثلة القليلة على هذه الجسيمات النانوية السيليكا، وأنابيب الكربون النانوية، والذهب، والفضة، وأكسيد الحديد، وثاني أكسيد التيتانيوم، وأكسيد الزنك، وما إلى ذلك.

تُستخدم تقنية النانو في المنسوجات لتعزيز خصائص النسيج والراحة والوظيفة. يتم استخدام المواد النانوية في الوقت الحاضر بشكل متزايد في تطبيقات مختلفة تتراوح من الرياضة والرعاية الصحية إلى الفضاء الجوي والأزياء. توفر المواد النانوية، مثل الجسيمات النانوية والألياف النانوية والمركبات النانوية المدمجة في المنسوجات، تحسينات ملحوظة في جودة المنتجات النسيجية.

تلعب تكنولوجيا النانو أيضًا دورًا حاسمًا في مواجهة التحديات الناشئة في مجال المنسوجات، مثل الحاجة إلى خامات وعمليات مستدامة وصديقة للبيئة. ومن خلال دمج المواد النانوية، يمكن لصناعة النسيج تطوير منتجات مبتكرة تلبي متطلبات المستهلكين المتطورة، مثل المنسوجات الذكية للتكنولوجيا القابلة للارتداء، والأقمشة الواقية لتطبيقات السلامة، والمنسوجات المستدامة من أجل مستقبل افضل وبيئة خضراء. تكمن أهمية تكنولوجيا النانو في قدرتها على المساهمة في التقدم في قطاعاتها المختلفة من خلال كسر حدود علوم النسيج والابتكار والقدرة التنافسية في السوق.

أنواع المواد النانوية المستخدمة في النسيج: تشمل العناصر والمركبات الأكثر استخدامًا في تصنيع المواد النانوية الفضة والكربون وأكسيد التيتانيوم وأكسيد الزنك وأكسيده السيليكون.
(Prasad, et al.,2024)

المواد النانوية المستخدمة في النسيج:

2-1-1- الألياف النانوية: Nanofibers

ألياف النانو هي ألياف متناهية الصغر بأقطار في نطاق النانومتر. غالبًا ما يتم استخدامها في المنسوجات لتطبيقات مثل الترشيح وتضميد الجروح وهندسة الأنسجة والملابس الواقية وأجهزة الاستشعار وأجهزة تخزين الطاقة والمنسوجات الذكية. يعد الغزل الكهربائي تقنية شائعة لإنتاج الألياف النانوية. أنها تنطوي على تطبيق المجال الكهربائي إلى محاليل البوليمر أو ذوبانه، مما يؤدي إلى ألياف متناهية الصغر ذات نسبة عالية من مساحة السطح إلى الحجم ووظائف فريدة. باستخدام عملية الغزل الكهربائي.
(Sawhney, et al., 2008)

فتحت تقنية الالياف النانونية طرقًا جديدة لتطوير الملابس وإضافة الوظائف المرغوبة فيها من راحة والأداء عالي. برز النانوسليلوز كأحد أنواع الالياف النانوية المستدامة الواعدة بسبب هياكله الفريدة وخصائصه الرائعة. (Saleh, et al.,2023)

2-1-2- الطين النانوي: Nanoclay

وهو عبارة عن سيليكات معدنية ذات طبقات ثنائية الأبعاد طبقة سمكها 1 نانومتر ولها خواص ميكانيكية عالية جدًا. يمكن دمج الطبقات النانوية في ألياف النسيج والطلاءات لتحسين خصائص الحاجز ومقاومة اللهب والقوة الميكانيكية. (Göcek, 2019)

2-1-3- المركبات النانوية:Nanocomposites

يتضمن تصنيع المركبات النانوية دمج مواد تقوية نانوية، مثل الجسيمات النانوية أو الطين النانوي، في مادة مصفوفة، غالبًا ما تكون بوليمر. في المنسوجات، يمكن للمركبات النانوية تحسين خصائص مثل قوة الشد، ومقاومة التآكل، وتثبيط اللهب.
(Gowri, et al., 2010)

2-1-4- الطلاء النانوي: Nanocoatings

يمكن تعريف الطلاءات النانوية بأنها تحتوي إما على سمك الطلاء بالمقياس النانوي أو جزيئات الطور الثاني المنتشرة في المصفوفة في نطاق حجم النانو أو الطلاءات التي تحتوي على حبيبات/أطوار نانوية، وما إلى ذلك. ويمكن تطبيق الطلاءات النانوية على المنسوجات لتعزيز خصائص مثل: طارد للماء، ومقاومة البقع، وحماية من الأشعة فوق البنفسجية. (Riaz, et al., 2018)

2-1-5- المواد المسامية النانوية: Nanoporous materials

يتم تعريف المواد النانوية على أنها تكون عضوية أو غير عضوية عادية ذات مسام يبلغ حجمها 100 نانومتر أو أصغر. يمكن دمج المواد المسامية النانوية في المنسوجات لتحسين التهوية والتحكم في الرطوبة، مما يجعل الملابس أكثر راحة لمرتديها.

2-1-6- أنابيب الكربون النانوية: Carbon nanotubes

أنبوب الكربون النانوي عبارة عن هيكل أسطواني يتكون من الكربون، ويتميز بقطر ضمن مقياس النانومتر. تمثل هذه الأنابيب شكلاً محددًا من متآصلات الكربون. على سبيل المثال، تتراوح أقطار الأنابيب النانوية الكربونية أحادية الجدار بين 0.5 و2.0 نانومتر، مما يجعلها أصغر بنحو 100 ألف مرة من عرض شعرة الإنسان. يمكن دمج أنابيب الكربون النانوية (CNTs) في المنسوجات لتعزيز التوصيل الكهربائي والقوة الميكانيكية، يتم استخدامها في تطبيقات مثل المنسوجات الموصلة والإلكترونيات القابلة للارتداء والدرع الكهرومغناطيسي.

برغم مزايا أنابيب الكربون النانوية ولكن تكاليف الإنتاج المرتفعة تحد حاليًا من التطبيقات التجارية.

2-1-7- الصبغات النانوية: Nano pigments

تُظهر الصبغات النانوية قوة وثباتًا عاليًا للألوان. يمكن استخدامها في المنسوجات للحصول على ألوان نابضة بالحياة وطويلة الأمد، بالإضافة إلى الحماية من الأشعة فوق البنفسجية وخصائص التنظيف الذاتي.

2-1-8- الجسيمات النانوية:Nanoparticles

يمكن دمج أنواع مختلفة من الجسيمات النانوية، مثل الجسيمات النانوية الفضية والجسيمات النانوية لثاني أكسيد التيتانيوم والجسيمات النانوية لأكسيد الزنك، في المنسوجات لتوفير خصائص مضادة للميكروبات وحاجبة للأشعة فوق البنفسجية ومقاومة للبقع.

2-1-9- الماس النانوي: Nano diamonds

يشير الماس النانوي إلى جزيئات الماس ذات أبعاد في نطاق النانو، والتي تتراوح عادة بضع مئات من النانومترات في الحجم. يمتلك هذا الماس النانوي خصائص فريدة ويجد تطبيقات في مختلف المجالات. يمكن أن يوفر استخدام الماس النانوي في المنسوجات العديد من الفوائد، مما يعزز أداء ووظيفة الأقمشة. يمتلك الماس النانوي موصلية حرارية عالية وصلابة استثنائية.
(Prasad, et al.,2024)

2-1-10- مواد تغيير الطور المغلفة بالنانو Nano encapsulated Phase Change Materials

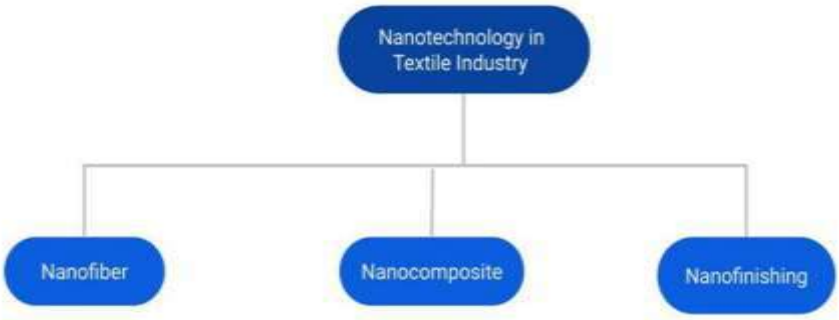
تتمتع مواد تغيير الطور (PCM) بالقدرة على تخزين الطاقة وإطلاقها. تم تحسين كفاءة PCMs من خلال عملية الكبسلة النانوية.

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is properly cited.

تُستخدم مواد تغير الطور المغلفة بالمقياس النانوي في المنسوجات لتوفير تنظيم درجة الحرارة. يمكنها امتصاص الحرارة وإطلاقها حسب الحاجة للحفاظ على مناخ محلي مريح لمرتديها. على سبيل المثال، يتم استخدام مواد PCM مثل الأيروجيل أو الألياف النانوية لتصنيع مواد عالية المسامية وخفيفة الوزن مع خصائص عزل حراري استثنائية. تحبس هذه المواد النانوية الهواء داخل هياكلها المسامية، مما يقلل من انتقال الحرارة ويوفر عزلًا فعالاً. ويعد هذا ذا قيمة خاصة في تطبيقات مثل الملابس الخارجية، والفراش، ومواد البناء، حيث تكون الراحة الحرارية وكفاءة الطاقة أمرًا بالغ الأهمية يوفر تضمين تقنية PCM راحة معززة تساهم في الاستدامة وتحسين البيئة.(Demirbağ & Aksoy , 2016)

11-1-2- الأنواع الرئيسية للنانو تكنولوجي في صناعة النسيج:

هناك ثلاثة أنواع رئيسية لاستخدامات الجسيمات في صناعة النسيج وهي (الألياف النانوية والمركبات النانوية والتجهيز النانوي) كما هوموضح في شكل رقم (1). (Prasad, et al.,2024)



شكل (1) الأنواع الرئيسية للنانو في صناعة النسيج. (Prasad, et al.,2024)

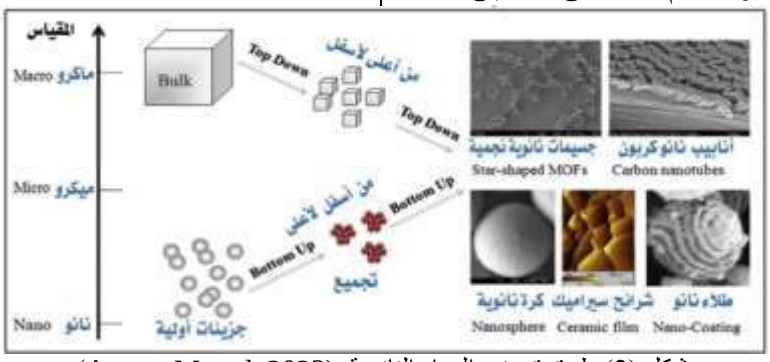
12-1-2- طرق تصنيع المواد النانوية Nanomaterials Manufacturing:

هناك عدة طرق لتصنيع المواد النانوية، وقد تم تصنيفها إلى طريقتين رئيسيتين، يندرج تحت كل منهما عدد كبير من طرق التصنيع وهما:

الطريقة الأولى: من الأعلى إلى الأسفلTop-Down Methods" حيث تبدأ الطريقة من مادة كبيرة الحجم Bulkحتى نصل إلى الشكل والحجم المطلوب وهذا يتم باستخدام طرق ميكانيكية كالتكسير والطحن أو وسائل وطرق كيميائية وفيزيائية.

الطريقة الثانية: من الأسفل إلى الأعلى، Bottom-Up Methods وهى تبدأ بالذرات والجزيئات بفصلها وتجميعها لحجم النانو بطرق كيميائية كما هو موضح في شكل (2).

(Asmaa Murad, 2023)



شكل (2) طرق تصنيع المواد النانوية. (Asmaa Murad, 2023)

2-2- الاستدامة:

ظهر مصطلح الاستدامة (Sustainability) في أواخر الثمانينات في تقرير (Brundtland report) عام 1987. هذا التقرير جاء بعد أزمة البترول والتي أظهرت محدودية الموارد الطبيعية، عندما حدثت عدة كوارث صناعية وبيئية، آنذاك زادت من أهمية وضرورة حماية الموارد والبيئة.

ويقصد بالتنمية المستدامة الحفاظ على البيئة واستيعاب الحاجات الحالية وتأثيرها على الأجيال القادمة، ولكي تكون التنمية المستدامة فعالة لابد من تقليل استهلاك الموارد لتحقيق الكفاءة الاقتصادية. (Subramanian Muthu, 2019)

1-2-2- أبعاد التنمية المستدامة:

تتمثل أبعاد التنمية المستدامة في ثلاثة ابعاد أساسيه وهما البعد الاجتماعي، البعد الاقتصادي، البعد البيئي وإلى جانب ذلك البعد الأخلاقي والبعد الموحد للشراكة: كما هو موضح في شكل (3). (United Nations, 2012)

شكل رقم (3) ابعاد التنمية المستدامة.(United Nations, 2012)

2-2-2- التسلسل الهرمي لادارة المخلفات:
الهدف من التسلسل الهرمي لادارة المخلفات(3R) هو تعظيم فوائد المنتجات والملابس وتقليل إنتاج النفايات التي تؤثر على البيئة وبالتالي تؤثر على صحة الانسان: كما هو موضح في شكل (4). (نجلاء طعيمة واخرون، 2024)

شكل رقم (4) التسلسل الهرمي للنفايات. (نجلاء طعيمة واخرون،2024)

أ- التقليل أو الخفض: الهدف هنا هو تقليل المواد الخام المستخدمة، وبالتالي تقليل النفايات، وذلك من خلال:
- استخدام مواد خام أقل.
- أو استخدام مواد خام تنتج مخلفات أقل
- او عن طريق الحد من المواد المستخدمة في عمليات التعبئة والتغليف.

ب- إعادة الاستخدام: هي إحدى طرق تحقيق الاستدامة عن طريق إعادة استخدام نفس المنتج كما هو او بعد تفكيكه في وظيفة اخري.

ج- إعادة التدوير: هي عمليه معالجة النفايات وتحويلها لمواد خام وإعادة تصنيعها واستخدامها في ظروف أخرى.
(Arasinah, et al., 2018)

2-3- الملابس المستدامة:
إن زيادة طلب العملاء على الملابس المتينة والعملية المصنعة بطريقة مستدامة قد خلقت فرصة لدمج المواد النانوية في ركائز النسيج. حيث ان العناصر النانوية بإمكانها أن تؤدي إلى مقاومة البقع، ومقاومة التجعد، والقضاء على الكهرباء الاستاتيكية، والتوصيل الكهربائي للألياف دون المساس براحتها ومرونتها.
توفر المواد النانوية أيضًا إمكانية تطبيق أوسع لإنشاء ملابس متصلة يمكنها الإحساس بالمحفزات الخارجية والاستجابة لها عبر الإشارات الكهربائية أو الملونة أو الفسيولوجية.
(Yetisen, 2016)

3- الدراسة العملية:
هناك العديد من التطبيقات العملية لتكنولوجيا النانو في صناعة المنسوجات والملابس المستدامة. لذلك فإن دمج المواد النانوية في المنسوجات يثريها بخصائص مختلفة ويعزز استدامتها، ومتانتها وأدائها بما يتجاوز منتجات المنسوجات الحالية كما هو موضح في شكل رقم (5):

شكل (5) تطبيقات تكنولوجيا النانو في المنسوجات (Yetisen, 2016).

ومن أهم تطبيقات تكنولوجيا النانو في مجال الملابس المستدامة الآتي:

3-1- تجهيز الاقمشة المضادة للبكتيريا والميكروبات Antibacterial and antimicrobial finishes :
اكتسبت التجهيزات المضادة للبكتيريا وللميكروبات في المنسوجات اهتمامًا كبيرًا نظرًا لقدرتها على منع نمو البكتيريا والكائنات الحية الدقيقة، وتقليل خطر العدوى. تلعب تقنية النانو دورًا حاسمًا في تعزيز فعالية ومتانة الاقمشة.
تُستخدم جسيمات الفضة النانوية (Ag-NPs) بشكل شائع في صناعة النسيج لخصائصها المضادة للميكروبات والفطريات.
وأيضا، تنقل جزيئات النحاس النانوية خصائص مضادة للميكروبات طويلة الأمد إلى النسيج.
وبالمثل، فإن بعض الجسيمات النانوية لأكسيد المعادن مثل ZnO وMgO وTiO2 وSiO2 تُظهر أيضًا أنشطة مضادة للميكروبات والفطريات.
تطلق هذه الجسيمات النانوية أيونات نشطة تعطل أغشية خلايا البكتيريا، وتمنع نموها وتكاثرها. يتيح استخدام تقنية النانو إطلاقًا متحكمًا للعوامل المضادة للميكروبات مما يزيد من فعاليتها ويقلل من الآثار الضارة المحتملة.

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is properly cited.

توفر التجهيزات المضادة للميكروبات بتكنولوجيا النانو مزايا مثل تحسين المتانة وتقليل التأثير البيئي مقارنة بالمعالجات التقليدية المضادة للميكروبات. وهذا يجعلها مناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات، بما في ذلك منسوجات الرعاية الصحية والملابس الرياضية ومعدات الحماية الشخصية، حيث يكون الحفاظ على النظافة ومنع التلوث البكتيري في غاية الأهمية.

يستخدم القطن عموماً في إنتاج المنسوجات للأنشطة الرياضية والترفيهية نظراً لقدرته المتميزة على امتصاص الرطوبة. بما أن القطن رطب، فهو عرضة للهجوم البكتيري ويؤدي نمو البكتيريا في المواد النسيجية إلى تدهور خصائص النسيج وتنتج روائح كريهة وتهيج الجلد وتسبب الالتهابات.

من الحقائق المعروفة أن البكتيريا يمكن أن تنمو وتعيش على الأقمشة الشائعة الاستخدام في بيئات الرعاية الصحية لأكثر من 90يوما وبالتالي تساهم في نقل الأمراض كان الاتجاه الأخير هو استخدام التجهيزات المضادة للميكروبات باستخدام المصادر الطبيعية، مما يعزز نمط الحياة الطبيعي والصديق للبيئة، والتركيز على احتياجات المستهلك على أحدث التطورات والأنماط الجديدة، كما أن هناك وعياً متزايداً بالتجهيزات الخاصة والمعالجات العملية الممنوحة للملابس لجعلها صديقة للبيئة وسهلة الاستخدام كما هو موضح في شكل رقم (6). (Neha, 2016)

3-2- الحماية من الأشعة فوق البنفسجية ومقاومة الإشتعال: UV protection and flame resistance

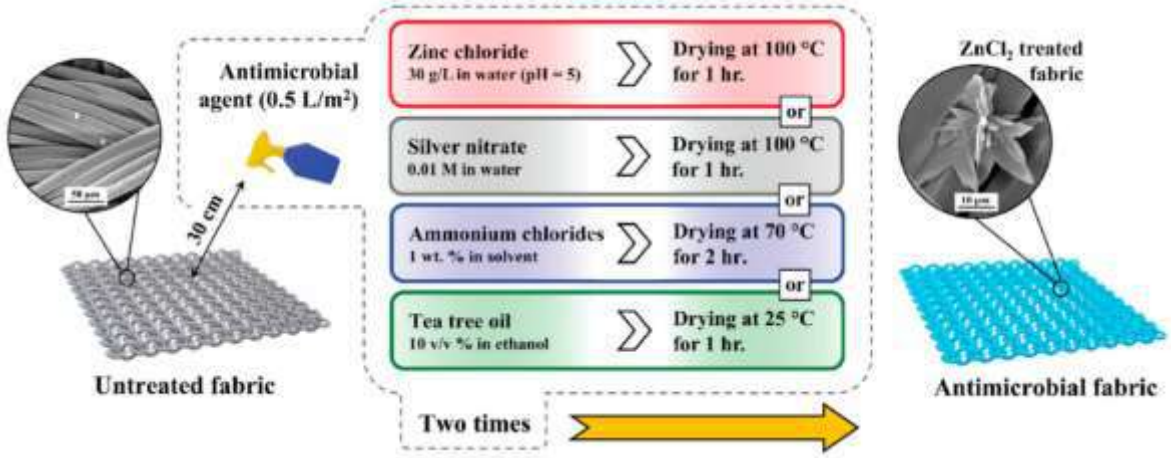
يتيح استخدام تكنولوجيا النانو تطوير المنسوجات ذات الحماية المحسنة من الأشعة فوق البنفسجية ومقاومة الإشتعال دون المساس بالخصائص المرغوبة الأخرى مثل الراحة والتهوية والجماليات.

يمكن استخدام المواد النانوية لتعزيز قدرات الحماية من الأشعة فوق البنفسجية للمنسوجات. تُستخدم عادةً جزيئات TiO2 وZnO أكسيد الزنك وثاني أكسيد التيتانيوم النانوية في صناعة النسيج لتحسين قدرة حجب الأشعة فوق البنفسجية للنسيج.

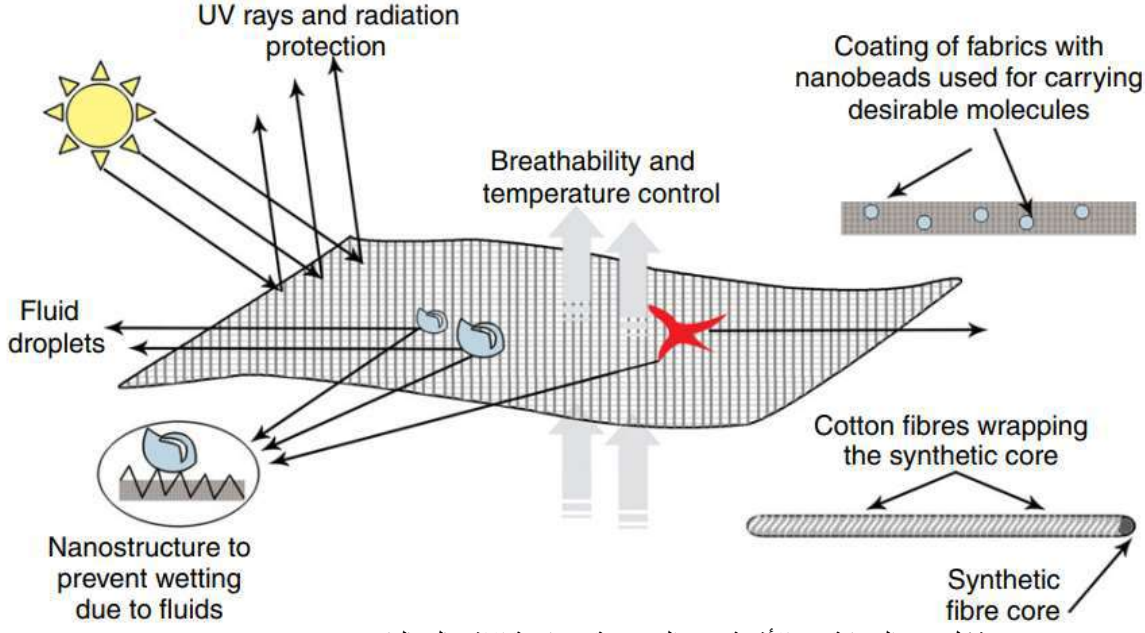
وهذا مهم بشكل خاص لتطبيقات مثل الملابس الواقية من الشمس والمنسوجات الخارجية وملابس السباحة والملابس العسكرية المعرضين لأشعة الشمس لمدة طويلة حيث يعد الحماية ضد الأشعة فوق البنفسجية الضارة أمرًا بالغ الأهمية.

توفر الحماية من الأشعة فوق البنفسجية القائمة على تقنية النانو مزايا مثل تقليل خطر الإصابة بحروق الشمس وسرطان الجلد إلى جانب الأداء طويل الأمد مما يحقق الاستدامة.(Srinivas, 2016)

تتميز هذه المركبات بأن لها القدرة العالية على تشتت الأشعة الفوق البنفسجية الساقطة وانعكاسها، لما لها من خصائص الانكسار العالي، وتتوافق مع جلد الانسان، والاستقرار الكيميائي في درجات الحرارة العالية، وتتمتع هذا الأكسيد في شكل جسيمات نانو، لها القدرة العالية على مقاومة للأشعة الفوق البنفسجية، وتتميز أيضا أنها أكثر استقرار مقارنة بالأكاسيد الأخرى. (شيماء عامر،2024)



شكل (6) التجهيزات المضادة للبكتيريا والميكروبات في المنسوجات.(Vojnits, 2024)



شكل (7) الحماية من الأشعة فوق البنفسجية ومقاومة الاشتعال بالنانو.(Srinivas, 2016)

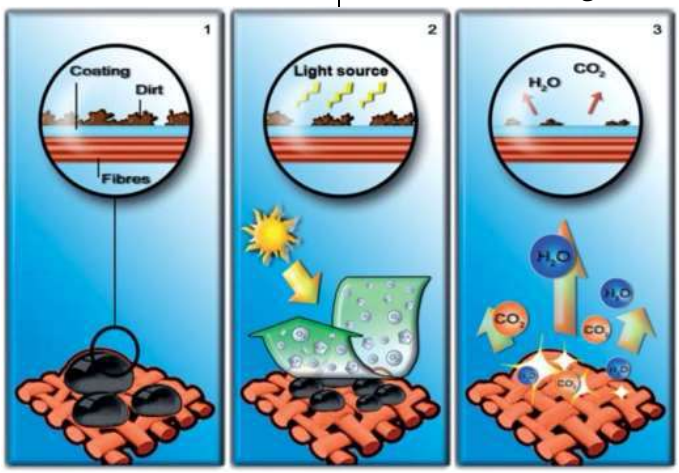
3-3- المنسوجات ذاتية التنظيف ومقاومة البقع: Self-cleaning and stain-resistant textiles

تُستخدم الجسيمات النانوية مثل ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO2) في تجهيز المنسوجات لتحقيق قدرات التنظيف الذاتي. عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية، تُظهر القماش المعالج بمادة TiO2 قدرات تحفيز ضوئي تعمل على تحليل البقع والألوان.

الطريقتان الأساسيتان للتنظيف الذاتي هما الكارهة للماء والمحبة للماء، حيث تقوم قطرات الماء المتدحرجة والمياه المغطية بتنظيف الأسطح الكارهة للماء، بينما تقوم المواد المحبة للماء بتكسير الأوساخ كيميائيًا عند تعرضها لأشعة الشمس.

تُستخدم هذه المواد النانوية في الملابس الخارجية وخاصة الملابس البيضاء سريعة الاتساخ، والمنسوجات المنزلية، والديكورات الداخلية للسيارات، والمفروشات حيث تكون مقاومة السوائل والبقع مطلوبة. (Yara, et al., 2024)

تستخدم مادة اكسيد التيتانيوم كمادة مستدامة لها من فوائد عديدة لأنها صديقة للإنسان والبيئة، وتكسب عملية التنظيف الذاتي للأقمشة المعالجة بتلك المادة، فهي تذيب الملوثات العضوية على سطح الأقمشة، كما هو موضح في شكل رقم (8). (شيماء عامر،2024)



شكل (8) أقمشة تكنولوجيا النانو ذاتية التنظيف. (شيماء عامر، 2024)

3-4- التحكم في الرائحة والرطوبة: Odor control and moisture

تقدم تقنية النانو حلولاً مبتكرة للتحكم في الرائحة والرطوبة في المنسوجات. يمكن دمج الجسيمات النانوية، مثل أكسيد الفضة أو الزنك، في المنسوجات لمنع نمو البكتيريا المسببة للرائحة، مما يحافظ على القماش منتعشًا وخاليًا من الرائحة حتى بعد الاستخدام لفترة طويلة. تطلق هذه الجسيمات النانوية عوامل مضادة للميكروبات تعمل على منع نمو البكتيريا المسببة للرائحة، وتمنع الرائحة الكريهة.

بالإضافة إلى ذلك، تتيح الرطوبة القائمة على تقنية النانو امتصاصًا فعالاً للرطوبة والتجفيف السريع، مما يعزز الراحة ويقلل من احتمالية نمو البكتيريا. تعمل الألياف النانوية والطلاءات النانوية على طرد الرطوبة من الجلد بشكل فعال وتسمح بالتبخر السريع، مما يضمن مناخًا محليًا جافًا ومريحًا. وتحسين النظافة، وإطالة فترة الانتعاش، وزيادة عمر الملابس في الاستخدام، وتعزيز راحة مرتديها في مختلف التطبيقات، بما في ذلك الملابس الرياضية والملابس الخارجية، وامتصاص رائحة الأقمشة سيكون الأمر فعالاً من حيث التكلفة وصديقًا للبيئة .(Prasad, et al.,2024) كما هو موضح في شكل رقم (11)

شكل (9) تقنية النانو للتحكم في الرائحة والرطوبة في المنسوجات.
https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107067

3-5- نسيج النانو المقاوم للتجعد: Wrinkle resistance Nano-textile

استخدم عدد قليل من الباحثين ثاني أكسيد التيتانيوم وجسيمات السيليكا النانوية لتحسين مقاومة القطن والحرير للتجعد. تعمل الجسيمات النانوية كدرع يمنع التجعد حتى بعد الاستخدام الطويل. ونتيجة لذلك، تحافظ الملابس المصنوعة من هذه الأقمشة المبتكرة على مظهرها الأصلي طوال اليوم، مما يلغي الحاجة إلى الكي أو الكي بالبخار بشكل متكرر. مما يوفر طاقة ويحافظ على الخامات لأطول فترة ممكنه.

وبفضل مقاومتها الاستثنائية للكرمشة ومتانتها ووظيفتها، تمثل أقمشة النسيج النانوي تقدمًا متطورًا في صناعة الأزياء، مما يرفع تجربة الملابس لمرتديها في جميع أنحاء العالم كما هو موضح في شكل رقم (10).(Gulati, et al., 2022)

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is properly cited.

شكل (10) نسيج النانو المقاوم للتجعد. (Gulati, et al., 2022)

3-6- تعزيز الخصائص الميكانيكية Enhanced mechanical properties

توفر تقنية النانو فرصًا لتعزيز القوة الميكانيكية وخصائص المنسوجات. من خلال دمج مواد الحشو النانوية، مثل الطين النانوي، في ألياف النسيج أو الطلاءات، يمكن تحقيق تحسينات كبيرة في قوة الشد، ومقاومة التمزق، واستقرار الأبعاد. بالإضافة إلى ذلك، تتيح تقنية النانو تطوير طبقات عازلة توفر مقاومة ممتازة ضد اختراق السوائل ونفاذية الغاز وترشيح الجسيمات.

تخلق الجسيمات النانوية، مثل أكسيد الجرافين أو أنابيب الكربون النانوية، هياكل كثيفة مما يمنع مرور السوائل والغازات بشكل فعال. تعتبر هذه الخصائص الميكانيكية والحاجزية المحسنة مفيدة في العديد من التطبيقات، بما في ذلك الملابس الواقية والمنسوجات الخارجية والأقمشة التقنية حيث تكون المتانة والقوة ومقاومة العناصر الخارجية ضرورية. (Prasad, et al.,2024)، كما هو موضح في شكل رقم (11)

شكل (11) الملابس الواقية.

https://www.denetim.com/ar/covid-19/medikal-onluk-ve-giysi-testleri/en-1073-2-radyoaktif-kirlenmeye-karsi-koruyucu-giysiler-bolum-2-parcacik-radyoaktif-kirlenmeye-karsi-havalandirmayan-koruyucu-giysiler-/icin-gereklilikler-ve-test-yontemleri

3-7- المنسوجات الموصلة والاستشعار Conductive and sensing textiles:

أحدثت المنسوجات الموصلة والمستشعرة ثورة في مجال التكنولوجيا القابلة للارتداء والمنسوجات الذكية. ومن خلال دمج النسيج مع المواد النانوية الموصلة، مثل البوليمرات الموصلة أو الجسيمات النانوية المعدنية، تكتسب الأقمشة القدرة على توصيل الكهرباء. وهذا يمهد الطريق لدمج المكونات الإلكترونية، وأجهزة الاستشعار، والمحركات مباشرة في المنسوجات، مما يتيح تطبيقات مثل الإلكترونيات القابلة للارتداء، وأنظمة المراقبة الصحية، والملابس التفاعلية.

تعمل تقنية النانو أيضًا على تسهيل تطوير مواد موصلة مرنة وقابلة للتمدد، مما يضمن الراحة والمتانة في التطبيقات القابلة للارتداء. علاوة على ذلك، فإن دمج أجهزة الاستشعار النانوية، مثل أنابيب الكربون النانوية في المنسوجات يمكّن من مراقبة المعلمات الفسيولوجية أو الظروف البيئية أو السلامة الهيكلية في الوقت الفعلي.

تتمتع منسوجات الاستشعار هذه بإمكانيات هائلة في تطبيقات الرعاية الصحية والرياضة والسلامة، حيث تعد المراقبة المستمرة وجمع البيانات أمرًا بالغ الأهمية. (Kang, et al., 2022) كما هو موضح في شكل رقم (12)

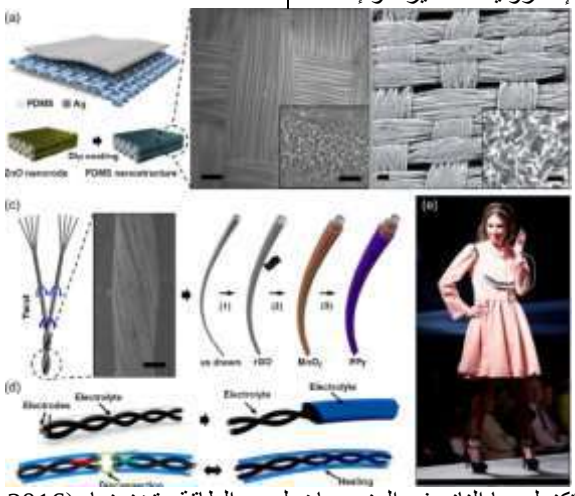
شكل (12) نظام المنسوجات الإلكترونية الذكي: الطاقة والاستشعار والاتصالات.
https://www.denetim.com/ar/covid-19/medikal-onluk-ve-giysi-testleri/en-1073-2-radyoaktif-kirlenmeye-karsi-koruyucu-giysiler-bolum-2-parcacik-radyoaktif-kirlenmeye-karsi-havalandirmayan-koruyucu-giysiler-icin-gereklilikler-ve-test-yontemleri

3-8- تجميع الطاقة وتخزينها: Energy harvesting and storage

أحدثت تكنولوجيا النانو ثورة في جمع الطاقة وتخزين المنسوجات، مما يوفر إمكانيات جديدة لمصادر الطاقة المحمولة والمكتفية ذاتيا. ومن خلال دمج المواد النانوية، مثل الأسلاك النانوية أو المولدات النانوية، في المنسوجات، يمكن تحويل الطاقة المحيطة، مثل الطاقة الميكانيكية أو الحرارية، إلى طاقة كهربائية.

يتيح ذلك توليد الطاقة من حركات الجسم أو الاهتزازات أو الفروق في درجات الحرارة و تشغيل الأجهزة الإلكترونية الصغيرة أو إعادة شحن البطاريات أو المكثفات الفائقة، التي يمكن دمجها بسلاسة في المنسوجات.

إن التقدم في حصاد الطاقة وتخزينها من خلال تكنولوجيا النانو في المنسوجات يحمل إمكانات هائلة لإنشاء تقنيات قابلة للارتداء مستديمة تعمل بالطاقة الذاتية وموفرة للطاقة ويمكن أن تعمل بشكل مستقل في بيئات مختلفة كما هو موضح في شكل رقم (13). (Yetisen, 2016)



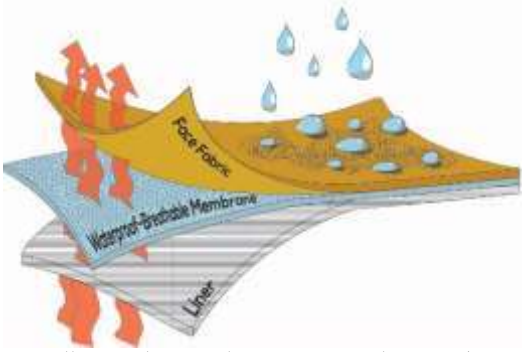
شكل (13) تكنولوجيا النانو في المنسوجات لجمع الطاقة وتخزينها. (Yetisen, 2016)

3-9- منسوجات ذات نفاذية ومقاومة للماء Breathable and waterproof textiles

تقنية النانو أدت إلى تطوير المنسوجات ذات نفاذية والمقاومة للماء، مما يوفر توازنًا بين نفاذية البخار ومقاومة الماء. من خلال دمج المواد النانوية المقاومة للماء في هياكل النسيج، يمكن للأقمشة تحقيق تهوية محسنة مع الحفاظ على خصائص مقاومة للماء ممتازة. تسمح الأنسجة بمرور بخار الرطوبة عبر المسام المجهرية بينما تحجب الماء السائل، مما يمنع تشبع القماش.

يعد هذا المزيج من التهوية ومقاومة الماء أمرًا ضروريًا في العديد من التطبيقات، بما في ذلك الملابس الخارجية والملابس الرياضية ومعدات الحماية، حيث تعد إدارة الرطوبة والراحة أمرًا ضروريًا. توفر المنسوجات المقاومة للماء وذات نفاذية والتي تعتمد على تقنية النانو راحة محسنة لمرتديها وأداء طويل الأمد وحماية ضد العناصرالخارجية، مما يضمن مناخًا محليًا جافًا ومريحًا داخل القماش. (Prasad, et al.,2024) كما هو موضح في شكل رقم (14)

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is properly cited.

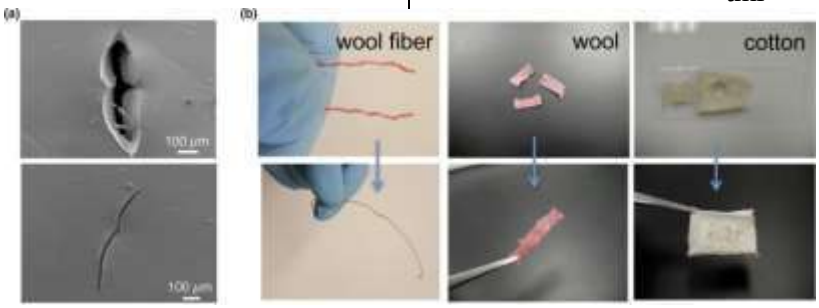


شكل (14) المنسوجات ذات النفاذية والمقاومة للماء.
https://mazalovesk.pics/product_details/54314657.html

3-10- المنسوجات ذاتية الإصلاح: Self-Healing textiles

لقد أدخلت تقنية النانو خصائص الإصلاح الذاتي والمضادة للكهرباء الاستاتيكية على المنسوجات، مما أدى إلى تعزيز متانتها ووظيفتها. تشتمل المنسوجات ذاتية الإصلاح على كبسولات نانوية تحتوي على عوامل علاجية، والتي يتم إطلاقها عند تلف القماش. تتفاعل عوامل الإصلاح هذه مع البيئة، مما يؤدي إلى إصلاح النسيج واستعادة سلامته.

تتيح هذه التقنية للمنسوجات التعافي من الجروح الصغيرة أو الخدوش، مما يطيل عمرها ويقلل الحاجة إلى الإصلاحات أو الاستبدالات المتكررة. توفير الوقت والجهد والمال المهدر في عمليات الصيانة وإهدار الخامات كما هو موضح في شكل رقم (15). (Ramesh, et al., 2022)



شكل (15) تقنية النانو للإصلاح الذاتي للمنسوجات. (Ramesh, et al., 2022)

4- النتائج: Results

ويمكن تلخيص نتائج البحث في النقاط الآتية:

1- توصل البحث الى إمكانية إنتاج ملابس مستدامة بتقنية النانو تكنولوجي، من خلال الاستفادة منها لتحسين الأداء الوظيفي للأقمشة وجعلها أكثر استدامة.

2- استخدام المواد الطبيعية المُستخدمة في تجهيز المنسوجات النانوية يعزز الصداقة البيئية، وهو بعد مهم من ابعاد الاستدامة.

3- التحسن الملحوظ في الخصائص يجعل التجهيزات النانوية للملابس أكثر قابلية للتطبيق من الجانب الاقتصادي، و هو بعد اخر من ابعاد الاستدامة.

4- تكنولوجيا النانو في مجال الملابس وتطبيقاتها المتنوعة توضح الإمكانات الهائلة للمواد النانوية في تعزيز الخصائص الوظيفية للأقمشة والملابس من خلال مايلي:

- توفير التجهيزات المضادة للميكروبات بتكنولوجيا النانو مزايا مثل تحسين المتانة وتقليل التأثير البيئي مقارنة بالمعالجات التقليدية المضادة للميكروبات. وهذا يجعلها مناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات، بما في ذلك منسوجات الرعاية الصحية والملابس الرياضية ومعدات الحماية الشخصية، حيث يكون الحفاظ على النظافة ومنع التلوث البكتيري في غاية الأهمية.
- توفير الحماية من الأشعة فوق البنفسجية القائمة على تقنية النانو مزايا مثل تقليل خطر الإصابة بحروق الشمس وسرطان الجلد إلى جانب الأداء طويل الأمد مما يحقق الاستدامة.
- تساهم تكنولوجيا النانو في تحسين مقاومة الإشتعال في الملابس. وبالتالي يتم استخدام المواد النانوية المقاومة الإشتعال لزيادة السلامة في مختلف المنتجات النسيجية مثل الملابس الوقائية.
- تُستخدم الجسيمات النانوية مثل ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) في تجهيز الملابس لتحقيق قدرات التنظيف الذاتي. لذلك تُستخدم هذه المواد النانوية في الملابس الخارجية وخاصة الملابس البيضاء سريعة الاتساخ، والملابس المنزلية، حيث تكون مقاومة السوائل والبقع مطلوبة.
- تقدم تقنية النانو حلولاً مبتكرة للتحكم في الرائحة والرطوبة في الملابس. يمكن دمج الجسيمات النانوية، مثل أكسيد الفضة أو الزنك، في المنسوجات لمنع نمو البكتيريا المسببة للرائحة، مما يحافظ على القماش منتعشًا وخاليًا من الرائحة حتى بعد الاستخدام لفترة طويلة.
- استخدام ثاني أكسيد التيتانيوم وجسيمات السيليكا النانوية لتحسين مقاومة القطن والحرير للتجعد. ونتيجة لذلك، تحافظ الملابس المصنوعة من هذه الأقمشة المبتكرة على مظهرها الأصلي طوال اليوم، مما يلغي الحاجة إلى الكي بشكل متكرر.
- تخلق الجسيمات النانوية، مثل أكسيد الجرافين أو أنابيب الكربون النانوية، هياكل كثيفة مما يمنع مرور السوائل والغازات بشكل فعال. تعتبر هذه الخصائص الميكانيكية والحاجزية المحسنة مفيدة في العديد من التطبيقات، بما في ذلك الملابس الواقائية .
- تعمل تقنية النانو أيضًا على تسهيل تطوير مواد موصلة مرنة وقابلة للتمدد، مما يضمن الراحة والمتانة في التطبيقات القابلة للارتداء.
- التقدم في حصاد الطاقة وتخزينها من خلال تكنولوجيا النانو في المنسوجات يحمل إمكانات هائلة لإنشاء تقنيات قابلة للارتداء مستديمة تعمل بالطاقة الذاتية وموفرة للطاقة ويمكن أن تعمل بشكل مستقل في بيئات مختلفة.
- تقنية النانو أدت إلى تطوير ملابس ذات نفاذية والمقاومة للماء، مما يوفر توازنًا بين نفاذية البخار ومقاومة الماء. من خلال دمج المواد النانوية المقاومة للماء في هياكل النسيج.
- لقد أدخلت تقنية النانو خصائص الإصلاح الذاتي والمضادة للكهرباء الاستاتيكية على الملابس، مما أدى إلى تعزيز متانتها ووظيفتها. تشتمل الملابس ذاتية الإصلاح على كبسولات نانوية تحتوي على عوامل علاجية، والتي يتم إطلاقها عند تلف القماش.

التوصيات: Recommendation

1- زيادة الاهتمام بتطبيق النانو تكنولوجي والاستفادة من المواد النانوية في الملابس المستدامة ذلك ورفع كفاءتها داخل جمهورية مصر العربية وتوفير الطاقة للأجيال القادمة.

2- توجيه الباحثين على اجراء البحوث العلمية في مجالات النانو وخاصة النسيج والملابس المستدامة.

3- فتح مجال عمل جديد أمام الشركات والمصانع في إطار ثورة الملابس المستدامة والمهتمة بصحة الإنسان وبيئته.

4- الاهتمام بتوفر المعامل بالجامعات تختص بتطبيق النانوتكنولوجى وباستخدام المواد النانوية ليكون نموذجاً حياً يرجع إليه الباحثون في هذا المجال.

المراجع: References

1- داليا عبد الحفيظ; ماجدة ماضى; حازم عبد الفتاح; منى عبد الوهاب (2020): "دراسة استطلاعية لواقع الاستدامة في مصانع الملابس الجاهزة بجمهورية مصر العربية ."مجلة التربية النوعية والتكنولوجيا بحوث علمية وتطبيقية، م 16،ع 7، (تخصص إعلام تربوي - اقتصاد منزلي - تربية فنية).

2- شيماء عامر (2024). تأثير التغير في التراكيب البنائية وتقنية النانو على الخواص الوظيفية لأقمشة ملابس الحماية لعمال البناء تقاوم الأشعة الفوق البنفسجية، مجلة التصميم الدولية، م 14، ع 4، 457-468.

3- شيماء عامر (2024). تحقيق التنمية المستدامة باستخدام المعالجة بثاني أكسيد التيتانيوم لإنتاج أقمشة ملابس حماية للعاملين في مجال الأحبار تنظف ذاتياً، مجلة التصميم الدولية، م 14، ع 5، 85-96.

4- نجلاء طعيمة، أميرة النوساني، طارق زغلول (2024). تحقيق الاستدامة لملابس المراهقين باستخدام الحرف اليدوية .مجلة الفنون والعلوم التطبيقية، م 11، ع1، 244-225.

5- Prasad, S. R., Kumbhar, V. B., Prasad, N. R. (2024). Applications of Nanotechnology in Textile: A Review. ES Food and Agroforestry. Engineered Science Publisher.

6- Riaz, Shagufta & Ashraf, Munir & Hussain, Tanveer & Hussain, Muhammad & Rehman, Abdur & Javid, Amjed & Iqbal, Kashif & Basit, Abdul & Aziz, Humera. (2018). Functional finishing and coloration of textiles with nanomaterials. Coloration Technology. 134. 10.1111/cote.12344.

7- Janet Hethorn & Connie Ulasewicz. (2008). “Sustainable Fashion Why Now?” NEW YORK: Fair child Books, INC.

8- Asmaa Mohamed Galal Murad(2023): "Nanotechnology Effect on Internal Architecture for Museums". Arts and Architecture Journal, 4, 1, 2023, 27-59.

9- B, Singh KV, Pang SS, Li G, Hui D. (2008). Modern Applications of Nanotechnology in Textiles. Textile Research Journal. ;78(8):731-739.

10-Göcek, İ. (2019). Functionalization of Textile Materials with Nanoclay Incorporation for Improved Characteristics. Politeknik Dergisi, 22(2), 509-522.

11-Gowri S, Almeida L, Amorim T, Carneiro N, Pedro Souto A, Fátima Esteves.M.(2010). Polymer Nanocomposites for Multifunctional Finishing of Textiles - a Review. Textile Research Journal. Volume 80(13):1290-1306.

12-Mathiazhagan, A. and Rani Joseph. “Nanotechnology-A New Prospective in Organic Coating - Review.” International Journal of Chemical Engineering and Applications 225-237.

13-Demirbağ, S., Aksoy, S.A. (2016).Encapsulation of phase change materials by complex coacervation to improve thermal performances and flame retardant properties of the cotton fabrics. Fibers Polym 17, 408–417.

14-Subramanian Muthu (2019): Fast Fashion, "Fashion Brands and Sustainable Consumption", Textile Science and Clothing Technology, Springer, Kowloon, Hong Kong.

15-United Nations (2012): " Sustainable Development", Department of Economic and Social Affairs,THE 17 GOALS | Sustainable Development (un.org), 11(1), 225-244.

16-Arasinah Kamis, Nornazira Suhairom, Rahimah Jamaluddin, Rodia Syamwil & Farah Puad (2018): "Environmentally sustainable apparel: recycle, repairing and reuse apparel", The International Journal of Social Sciences and Humanities Invention, 5(1), 4249-4257.

17-Yetisen, A. K., Qu, H., Manbachi, A., Butt, H., Dokmeci, M. R., Hinestroza, J. P., … Yun, S. H. (2016). Nanotechnology in Textiles. ACS Nano. American Chemical Society.

18-Neha Sharma, Savita Janaki , Thakur Gurjeet Singh , Sanjeev Kumar , (2016): Nanoparticles: boon to mankind and bane to pathogens, Nanobiomaterials in Antimicrobial Therapy, Applications of Nanobiomaterials, Chapter 14–, 6, 483-509,

19-Vojnits, K.; Mohseni, M.; Parvinzadeh Gashti, M.; Nadaraja, A.V.; Karimianghadim, R.; Crowther, B.; Field, B.; Golovin, K.; Pakpour, S. (2024). Advancing Antimicrobial Textiles: A Comprehensive Study on Combating ESKAPE Pathogens and Ensuring User Safety. Materials , 17, 383

20-Srinivas, Kurapati. (2016): “The role of nanotechnology in modern textiles.” Journal of chemical and pharmaceutical research 8.

21-Yara Abd El-monem Roshdy; Merehan Nagy El-Shamy; Heba Arafat Mohamed; Zahra Sherif Gaafar; Ahmed G. Hassabo. (2024) :"Self-Cleaning Cotton Textiles Enhanced with Nanotechnology". Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science-. doi: 10.21608/jtcps.2024.259176.1284

22-Gulati, S., Kumar, S., Kumar, S., Wadhawan, V., Batra, K. (2022). Wrinkle-Resistant Fabrics: Nanotechnology in Modern Textiles. In: Handbook of Consumer Nanoproducts. Springer,

23-Kang Du,Rongzhou Lin,Lu Yin,John S. Ho,Joseph Wang,Chwee Teck Lim (2022). Electronic textiles for energy, sensing, and

Open Access article distributed under the Creative Commons Attribution License permiting unrestricted use in any medium, provided the work is properly cited.

communication. Journal of iScience VOLUME 25, ISSUE 5.

24-Ramesh, S., Khan, S., Park, Y., Ford, E., Menegatti, S., & Genzer, J. (2022). [Review of Self-healing and repair of fabrics: A comprehensive review of the application toolkit]. MATERIALS TODAY, 54, 90–109.

25-Saleh, S., Hassan, T., Idrees, H., Zaghlol, T., & badr, M. (2023). Devolving Polyester Sportswear Knitted Fabric Using Nanocellulose Fibers from Cotton Linter. Egyptian Journal of Chemistry, 66(6), 187-196.

26-https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128214831000164 retrieve in 13/10/2024

27-https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107067 retrieve in 13/10/2024

28-. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8698-6_97 retrieve in 13/10/2024

29-https://www.denetim.com/ar/covid-19/medikal-onluk-ve-giysi-testleri/en-1073-2-radyoaktif-kirlenmeye-karsi-koruyucu-giysiler-bolum-2-parcacik-radyoaktif-kirlenmeye-karsi-havalandirmayan-koruyucu-giysiler-icin-gereklilikler-ve-test-yontemleri/ retrieve in 13/10/2024

30-https://mazalovesk.pics/product_details/54314657.html retrieve in 13/10/2024