
الاستفادة من تقنية الغزل الرطب في إنتاج ألياف الكربون
ودراسة العوامل المؤثرة عليها

إعداد

أ.د. م. نهى محمد عبده

الاستاذ المساعد

بكلية الاقتصاد المنزلي جامعة المنوفية

أ.د. م. فوزى سعيد شريف

الاستاذ المساعد

بكلية الاقتصاد المنزلي جامعة المنوفية

مجلة بحوث التربية النوعية - جامعة المنصورة

عدد (٧٥) - مايو ٢٠٢٣

الاستفادة من تقنية الغزل الرطب في إنتاج ألياف الكربون ودراسة العوامل المؤثرة عليها

إعداد

أ.د.م. نهى محمد عبده*

أ.د.م. فوزي سعيد شريف*

ملخص البحث:

تعتبر ألياف الكربون من الخامات الفريدة عالية الأداء، فهي تحتوي علي ٩٠٪ علي الأقل من عنصرالكربون، بالإضافة الي خصائصها الميكانيكية المتميزة التي تؤهلها كي تكون الخيار الأول للعديد من التطبيقات الحياتية مقارنة بغيرها من الألياف عالية الأداء، فهي تتميز بالصلابة العالية و المتانة الفائقة و خفة الوزن. ألا أن المصنعين لتلك الألياف يلجأون أحيانا الي بعض الاجراءات أثناء انتاج تلك الألياف بتقنية الغزل الرطب أملا منهم في زيادة الانتاج و انخفاض التكلفة، فيقومون بزيادة نسبة معدل سحب الألياف بعد خروجها من حوض التخثر عن معدل السحب الطبيعي اثناء مرحلة الغزل الرطب. لذلك هدف هذا البحث الي ابراز تلك المشكلة التي قد يكون لها تأثير غير مرغوب فيه علي جودة و كفاءة ألياف الكربون المنتجة، وذلك بدراسة تأثير زيادة معدل سحب ألياف البولي أكريلونتريل (المصدر الأساسي لألياف الكربون) علي الخصائص الميكانيكية للألياف المنتجة. حيث تم تطبيق عدد ٤ نسب لزيادة معدل السحب (٢٥٪، ٥٠٪، ٧٥٪، ١٠٠٪) بالإضافة الي المعدل القياسي الطبيعي للسحب دون أي زيادة. و أوضحت نتائج الدراسة أن قوة الشد و الاستطالة و قطر الألياف قد تأثروا سلبيا بزيادة نسبة معدل السحب للألياف أثناء الغزل الرطب مقارنة بالعينة القياسية التي لم يزد بها معدل السحب، بينما تحسن السطح الخارجي للألياف بزيادة نسبة معدل السحب للألياف مقارنة بالعينة القياسية التي لم يزد بها معدل السحب. و هذا يعني عدم ملائمة اجراء زيادة نسبة معدل السحب للألياف للتطبيقات التي تتطلب معدل عالي من القوة و المتانة لتأثيره السلبي علي الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون المنتجة، بينما يتلائم ذلك الاجراء مع التطبيقات التي تتطلب مساحة سطح عالية دون الحاجة للقوة و المتانة، كما هو الحال بصناعات تخزين الطاقة و البطاريات.

الكلمات الافتتاحية: ألياف الكربون - المنسوجات التقنية - الغزل الرطب - البولي

أكريلونتريل.

* الاستاذ المساعد بكلية الاقتصاد المنزلي جامعة المنوفية.

** الاستاذ المساعد بكلية الاقتصاد المنزلي جامعة المنوفية

مقدمة البحث:

مقدمة:

تعتبر الخصائص الميكانيكية الفريدة و انخفاض الكثافة أهم ما يميز ألياف الكربون، وهو ما يجعلها من أفضل الخامات ذات الأداء العالي التي يتم الاعتماد عليها في العديد من الصناعات الخفيفة و الثقيلة والمتقدمة عل حد سواء (Dumanli. A. G., et al, 2012). و بفضل خصائصها الميكانيكية هذه. فانها تتميز بمعدل عالي من الصلابة و القوة يفوق أربع مرات صلابة الحديد. هذا المعدل الهائل من الصلابة يؤهلها و بجدارة للاستخدام بمجال التشييد و البناء حيث تتحمل من القوة ما يصل الي ٧ جيجا باسكال، و هو أعلى معدل يمكن أن تتحمله ألياف تجارية أخرى تستخدم بذلك المجال (Ogale. A. A., et al, 2016)

كان أول استخدام تجاري معروف لألياف الكربون هو ما تم استخدامه من كربنة القطن و ألياف الخيزران لصنع لخيوط المصايح المتوهجة في عام ١٨٧٩ ، حيث استخدم توماس إديسون لأول مرة خيوط ألياف الكربون في تجاربه المبكرة للمصباح الكهربائي المتوهج ، والتي استخدمت الكهرباء لتسخين شريط رقيق من الألياف يُسمى الشعيرة حتى يتوهج. في وقت لاحق، كانت ألياف الكربون التي صنعها إديسون باستخدام ألياف الخيزران الطبيعية أو خيوط القطن مقاومة للحريق ، مما يجعلها مثالية لشعيراته المتوهجة (Park. S. J, 2018).

و لكن كان استخدام خيوط الكربون للمصايح الكهربائية قصير العمر نسبياً، فسرعان ما أزاح سلك التنجستن خيوط الكربون هذه. و وجدت ألياف الكربون طريقها نحو التطبيقات المتعددة، فكانت تستخدم في سفن البحرية الأمريكية من قبل عام ١٩٦٠. و نظرا لكفاءة و متانة تلك الألياف فقد تم استخدامها لاحقا للتطورات الهيكلية في مجالات الفضاء والسيارات، و كما كان متوقعا فقد بدأت ألياف الكربون أن تحل محل الألياف الزجاجية في عدة مجالات ، بما في ذلك النقل و تشييد المباني والعزل البحري والكهربائي والحراري، حيث أصبح من الواضح أن ألياف الكربون بدأت تساهم بشكل كبير في قوة و صلابة المنتجات الهيكلية، بالإضافة الي العديد من المنتجات الأخرى (Bijwe. J, et al, 2001). و حيث أن ألياف الكربون تتميز بخصائص عدة مثل قوة الشد و الصلابة والكثافة المنخفضة والتوصيل الكهربائي، فقد تم استخدام ألياف الكربون لتصنيع السيارات الرياضية و الحديثة وكذلك المعدات الرياضية مثل أدوات الصيد ومضارب الجولف و التنس.

مشكلة البحث:

يتزايد الطلب العالمي هذه الأيام علي ألياف الكربون لما لها من خصائص متعددة تؤهلها للاستخدام بالصناعات المختلفة التي تعتمد علي المنسوجات عالية الأداء، و نظرا لارتفاع تكلفة إنتاج ألياف الكربون، فان بعض الشركات المصنعة له تلجأ أحيانا الي بعض الطرق التصنيعية التي قد تزيد من كمية الإنتاج اليومي له و تخفض من سعره. و ذلك بالتحكم ببعض مراحل التصنيع المختلفة، و التي منها مرحلة الغزل الرطب، و التي من خلالها يقومون بزيادة معامل المرونة

(stretching) أثناء إنتاج الألياف. أملا منهم في زيادة الطول النهائي لها. و قد تنجح تلك الطريقة في زيادة الانتاج بالفعل، إلا أنه قد يكون له بالغ الأثر السلبي علي الخصائص الميكانيكية للألياف المنتجة بتلك الطريقة، مما قد يكون سبب مباشر في انخفاض جودة تلك الألياف و عدم قدرتها علي القيام بالأغراض الوظيفية المطلوبة منها بالشكل الصحيح. من هنا جاء دور هذا البحث لدراسة تأثير زيادة معامل المرونة أثناء مرحلة الغزل الرطب للألياف علي خصائصها الميكانيكية.

أهداف البحث:

يهدف البحث الي:-

- القاء الضوء علي مرحلة هامة من صناعة ألياف الكربون، و هي مرحلة الغزل الرطب، و التي تعتبر البنية الأساسية لتلك الصناعة الهامة.
- التعرف علي التقنيات المستخدمة في صناعة ألياف الكربون، و التطبيقات الوظيفية المختلفة لها.
- دراسة تأثير معامل المرونة (Stretching) أثناء مرحلة الغزل الرطب لألياف الكربون علي الخصائص الميكانيكية لها.

أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في كونه من الأبحاث العلمية القليلة بمنطقتنا العربية، و الذي يتناول بشكل مباشر صناعة أحد أهم الألياف النسجية عالية الأداء و أوسعها انتشارا بجميع الأسواق العالمية و هي ألياف الكربون. تلك الألياف التي تعتبر في الوقت الحالي أحد أهم الركائز الأساسية للعديد من الصناعات الثقيلة و الخفيفة علي حد سواء، و ذلك لما تتمتع به تلك الألياف من خصائص ميكانيكية و كيميائية متعددة تمكنها من الاستخدام بالعديد من المنتجات الحياتية اليومية، و جعلها مصدر أساسي لجذب الاستثمارات و فتح أسواق محلية و دولية تساعد بشكل أساسي في النهوض بالمستوي الاقتصادي للدول.

فروض البحث:

- تغير الشكل المورفولوجي (سطح الألياف) لألياف الكربون بعد اتمام الغزل الرطب و تغيير معدلات السحب للألياف.
- امكانية حدوث تأثير سلبي لعملية زيادة نسب معدلات السحب للألياف أثناء عملية الغزل الرطب علي خاصية قوة الشد للألياف المنتجة.
- وجود علاقة عكسية بين زيادة معدلات السحب للألياف أثناء عملية الغزل الرطب و بين قطر الألياف المنتجة.
- وجود علاقة عكسية بين زيادة معدلات السحب للألياف أثناء عملية الغزل الرطب و بين معدل الاستطالة للألياف المنتجة.

مصطلحات البحث:

- ألياف الكربون (Carbon fibers):

تاريخياً، تم تعريف ألياف الكربون على أنها ألياف الجرافيت، والتي تعتمد في تكوينها على عنصر الكربون. و مع قيام الثورة الصناعية، أصبح مصطلح ألياف الكربون يطلق على تلك الألياف التي تمت معالجتها حرارياً في درجة حرارة ما بين 1000 و 1500 درجة سيليزية، بينما يطلق مصطلح ألياف الجرافيت على تلك الألياف التي تمت معالجتها حرارياً في درجة حرارة تصل الي 2000 درجة سيليزية. و تمثل نسبة الكربون بألياف الكربون ما بين 1 الي 99%، بينما تصل نسبة الكربون بألياف الجرافيت الي مافوق نسبة 99% فقط. و مع التطور التكنولوجي و الصناعي، اعتمدت الدراسات و الصناعات الحديثة على دمج مفهوم تلك الألياف تحت مسمى واحد و هو ألياف الكربون، و التي يمثل عنصر الكربون فيها نسبة 90% على الأقل (Park. S, 2018).

- الغزل الرطب (Wet spinning):

الغزل الرطب هو عملية تشكيل الألياف. بحيث يتم إذابة البوليمر في مذيب و تكوين محلول بوليمري، ثم يتم ضخ المحلول إلى حمام كيميائي (حوض تخثر) حيث يتم تخثر و تكون الألياف. و الغزل الرطب يعتبر تقنية تقليدية لتطوير و إنتاج ألياف قائمة على البوليمرات، و قد تم استخدام طريقة الغزل الرطب لأول مرة في صناعة الحرير الصناعي.

منهج البحث:

ينتهج البحث المنهج التجريبي لاتمام الاطار التطبيقي للبحث.

حدود البحث:

حدود زمنية: تم اجراء البحث في الفترة من ٠١.٠٨.٢٠٢١ و حتي ٠١.٠٧.٢٠٢٢

حدود مكانية: تم اجراء الجزء التجريبي الخاص بهذا البحث بالمركز البحثي لألياف الكربون (RCCF) التابع لمعهد (ITM) بجامعة درسدن التقنية بجمهورية ألمانيا الاتحادية، و ذلك أثناء احدي المهمات العلمية للباحث.

أدوات البحث:

قام الباحث باستخدام بعض الأدوات مثل:

- البولي أكريلونتريل (PAN) من شركة (DOLAN GmbH, Kelheim, Germany).
- ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) من شركة (Brenntag GmbH, Mülheim, Germany).
- ماكينة غزل رطب من شركة (Fourn Polymertechnik GmbH, Germany).
- اختبارات قوة الشد، الاستطالة، قطر الألياف، المسح الالكتروني (SEM).

الدراسات السابقة:

١- دراسة Chowdhury وآخرون:

كانت الدراسة بعنوان (دراسة الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون المدعومة بالبوليمرات المختلفة)، وهدفت تلك الدراسة الي تحليل خاصتي قوة الشد و الصلابة لألياف الكربون التي تم انتاجها باستخدام بعض المكونات الاضافية مثل الجرافين و البيوتادين استرين، و ذلك بالعديد من الطرق الاجرائية، و توصلت الدراسة الي ان استخدام البيوتادين استرين قد ساهم بشكل كبير في تحسين خاصية الصلابة لألياف الكربون، في حين أن استخدام الجرافين قد أدى الي تحسين خاصية قوة الشد بشكل ملحوظ (Chowdhury. N., et al. 2020).

٢- دراسة Torokhov وآخرون:

كانت الدراسة بعنوان (الخصائص الميكانيكية و الحرارية لألياف الكربون المدعومة بالبولي ايثرسلفون). وهدفت الدراسة الي تحسين الروابط بين مكونات الألياف و تحليل خصائص سطحها. و دراسة تأثير ذلك علي الخصائص الميكانيكية و الحرارية لألياف الكربون المنتجة. و أظهرت النتائج أنه باضافة البولي ايثر سلفون الي ألياف الكربون كان له بالغ الاثر علي تغير السطح الخارجي للألياف، و الذي أدى بدوره الي تحسن خاصية قوة الشد للألياف التي وصلت الي ٩٦٢ ميجاباسكال. بينما تأثر الاستقرار الحراري للألياف سلبيا باضافة البولي ايثر سلفون حيث بلغت درجة الاستقرار الحراري الي ٢١١ درجة سيلزيوس (Torokhov. V. G., et al, 2022).

٣- دراسة Almutairi وآخرون:

كانت الدراسة بعنوان (المعالجات المختلفة لأسطح ألياف الكربون و تأثيرها علي الألياف المنتجة) ، و كانت تهدف الي دراسة مدي جودة ألياف الكربون و مكوناتها اعتمادا علي نوع معالجة السطح التي تعرضت لها، و توصلت الدراسة الي أن معالجة أسطح ألياف الكربون لها تأثير مباشر علي الخصائص الكيميائية و الفيزيائية لها، كما تزيد من قوة الروابط الكيميائية بين مكوناتها. كما أن المعالجات الي ينتج عنها زيادة في مساحة سطح الألياف، ينتج عنها تحسن ملحوظ في قدرة تلك الألياف في الترابط مع مكونات أخرى تزيد من صلابتها و متانتها (Almutairi. M. K., et al, 2018).

٤- دراسة Hanna وآخرون:

كانت الدراسة بعنوان (تحضير و توصيف ألياف الكربون من البولي أكريلونتريل). و هدفت الدراسة الي انتاج ألياف الكربون من البولي أكريلونتريل و دراسة تأثير المعالجة الحرارية و الكربنة علي خصائص الألياف المنتجة. توصلت الدراسة الي أن المعالجة الحرارية لألياف الكربون التي يتم انتاجها من البولي أكريلونتريل عند درجة حرارة ١٤٠٠° سلزيوس، ينتج عنها محتوى كربوني يصل الي نسبة ٩٧.٥٥% و نيتروجيني بنسبة ١.٧٥% و هيدروجيني بنسبة ١.٤%، و هي الظروف الأنسب لانتاج ألياف كربون خالية من الأكسجين. (Hanna. S. B., et al, 2011)

هـ - دراسة Kim وآخرون:

كانت الدراسة بعنوان (دراس الحضيرات و الخصائص الحرارية لألياف الكربون المنتجة من البولي اثيلين منخفض الكثافة). وقد هدفت الدراسة الي استخدام حمض السلفورك مع البولي اثيلين منخفض الكثافة كمصدر لألياف الكربون و قياس الخصائص الحرارية لها. و أوضحت الدراسة أن نتائج التحليل الحراري (TGA) للألياف المنتجة قد أشارت الي تحسن درجة التحلل الحراري للألياف حيث وصلت الي 170 درجة سليوس، وهذا بفضل قوة الروابط بين مكونات الألياف، و يعد ذلك مؤشر قوي علي صلاحية البولي اثيلين منخفض الكثافة لإنتاج ألياف الكربون. (Kim, K. W., et al, 2015).

تصنيف ألياف الكربون:

هناك قدر كبير الان من الاهتمام لتقليل وزن سيارات الركاب لزيادة الاقتصاد في وقود المركبات وتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. ولذلك تُستخدم ألياف الكربون الآن في صناعة الهيكل الخارجي لسيارات الركاب و الطائرات و اليخوت والتطبيقات الصناعية مثل أوعية الضغط وطواحين الهواء والاستخدامات المتعلقة بالهندسة المدنية و الانشاءات. ومع ذلك، و نظراً لعمليات التصنيع المعقدة والمتعددة المراحل لألياف الكربون، نجحت ثماني شركات فقط، منها شركات Toray و Toho Tenax و Mitsubishi Chemical و Hexcel و Zoltek في الإنتاج الضخم لألياف الكربون. و من المعلوم، أنه يُحظر تصدير ألياف الكربون بشكل صارم في معظم الدول لأن ألياف الكربون تُستخدم على نطاق واسع في صناعة الأسلحة. و تقود شركة Toray تطوير ألياف الكربون عالية الأداء، حيث تتميز بصناعة ألياف الكربون عالية الأداء ذات قوة شد 7 جيجا باسكال و معامل شد 300 جيجا باسكال، مما أدى الي تنوع مجالات التطبيق المختلفة (Lee, S, et al, 2011)

و بالتالي فان ألياف الكربون تلعب دوراً حاسماً في مجموعة متنوعة من التطبيقات المتخصصة مثل تخزين الطاقة و الفضاء والسيارات والصناعات الكيماوية والهندسة العامة والصواريخ والطاقة النووية والمنسوجات، ويرجع ذلك الي خصائصها الاستثنائية حيث تتميز بالقوة العالية والصلابة و ثبات الأبعاد و معامل التمدد الحراري المنخفض و التوافق البيولوجي، وتحمل الاجهاد. و قد تم تصنيف ألياف الكربون بناءً على أساس بنية الألياف و معدل أدائها الي عدة فئات هي:

- فائقة الأداء (UMH).
- عالية الأداء (HM).
- متوسطة الأداء (IM).
- منخفض الأداء (HT).

حيث تتميز ألياف الكربون UHM و HM باحتوائها علي درجة عالية من الجرافيت، و هو ما يمنحهم معاملات قوة مرتفعة تصل الي 500 جيجا باسكال في حالة ألياف الكربون UHM، و 300 جيجا باسكال في حالة ألياف الكربون HM، بينما تحتوي ألياف الكربون IM و HT علي محتوى

منخفض من الجرافيت ومعدل قوة أقل من مثيلاتها. و بوجه عام فإن جميع الفئات السابقة تتميز بمعدل عالي من المتانة و القوة، لكن يتم توظيفها علي حسب الغرض الوظيفي للمنتج النهائي. (Park. S. J, 2018)

مصادر صناعة ألياف الكربون:

في السنوات الأخيرة، نمت صناعة ألياف الكربون بشكل مطرد، وذلك لتلبية الطلبات و الاحتياجات المستمرة الناجمة عن التطبيقات المختلفة مثل الطيران (أنظمة الطائرات والفضاء)، والجيش، ومراوح التوربينات، والتشييد و البناء، و غيرها من التطبيقات مثل الأسطوانات خفيفة الوزن وأوعية الضغط ، والسلع الطبية والسيارات والرياضية . علاوة على ذلك فقد تم البحث عن بدائل (سلائف) قد تستخدم لإنتاج ألياف الكربون. وبالتالي، كان البحث دائما عن مصادر متعددة لإنتاج ألياف الكربون. وبالفعل تم التوصل الي العديد من المصادر التي تمثل البنية الأساسية المطلوبة لتصنيع ألياف الكربون. و تتميز تلك المصادر بعدة مميزات هي سهولة التحويل إلى ألياف الكربون، والإنتاجية عالية من ألياف الكربون، التكلفة الاقتصادية المتميزة. و قد تم استخدام الأربعة عناصر التالية كمصادر أساسية لصناعة ألياف الكربون على نطاق واسع و بشكل أكثر شيوعاً: (Huang. Z. M, et al, 2003) (Elzatahry. A, 2014)

١. عنصر الأكريليك: حيث تم استخدامه بنجاح في تحضير ألياف الكربون من قبل معظم الشركات المصنعة لألياف الكربون، حيث يحتوي الأكريليك هذا على أكثر من ٨٥٪ من مونومر الأكريلونيتريل (AN)، و يعد بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) أكثر أشكال الأكريليك شيوعاً، والذي يستخدم على نطاق واسع لإنتاج ألياف الكربون.
٢. عنصر السليلوز: يحتوي السليلوز نظريا على ٤٤.٤٪ من الكربون. ومع ذلك، فإنه و نظرا لتعقيد عملية انتاج الياف الكربون منه. فإنه يفقد كثير من خصائصه بسبب التجفيف، و يكون محتوى الكربون الفعلي للألياف المنتجة منه حوالي ٢٥ - ٣٠٪ فقط.
٣. مشتقات البترول: وألياف الكربون الناتجة من هذه المصدر تظهر معامل قوة مرتفع بسبب طبيعة احتوائها على الجرافيت. من ناحية أخرى، فإن ألياف الكربون القائمة على مشتقات البترول لها خصائص كيميائية و فيزيائية أقل، مقارنة بألياف الكربون القائمة على PAN.
٤. مصادر أخرى: هناك محاولات عديدة لتصنيع ألياف الكربون بواسطة كلوريد الفينيلين وراتنجات الفينول كمصادر بديلة لتصنيع ألياف الكربون، ولكن لم تثبت جدواها الاقتصادية و التجارية حتى الان.

تطبيقات ألياف الكربون:

في العقود الأخيرة، وجدت ألياف الكربون طريقها الي العديد من التطبيقات الواسعة. فمثلا نجدها في صناعة الطائرات التجارية والمدنية، والترفيهية و غيرها من وسائل النقل، و يرجع ذلك الي خصائص القوة والصلابة والوزن المنخفض التي تتميز بها ألياف الكربون (Faruk. O, et al,

(Wu, H, et al, 2013) و من أبرز التطبيقات التي تساهم بها ألياف الكربون بشكل كبير (Sherif. F, 2016):

- العوازل الصوتية و الحرارية.
- تخزين الطاقة و البطاريات.
- الطائرات المقاتلة و النقل و التجارية.
- صناعة السيارات.
- التطبيقات البحرية.
- شفرات توربينات الرياح.
- التطبيقات الرياضية.
- البناء و التشييد.

الاطار التجريبي للبحث:

قام الباحث باجراء الجزء التجريبي الخاص بهذا البحث بالمركز البحثي لألياف الكربون (RCCF) التابع لجامعة درسدن التقنية بجمهورية ألمانيا الاتحادية، و ذلك أثناء احدي المهمات العلمية للباحث. و اعتمد البحث علي بوليمر البولي أكريلونيتريل (PAN) كمصدر رئيسي لألياف الكربون، كما تم استخدام ثنائي ميثيل فورماميد (DMF) كمذيب للبولي أكريلونيتريل. و قد تم تحضير محلول الغزل اعتمادا علي هذين المركبين بتركيز 18% بولي أكريلونيتريل الي 82% ثنائي ميثيل فورماميد، و قد تم تقليب المحلول لمدة 3 ساعات عند درجة حرارة 70 درجة سيليزية.

استخدام تقنية الغزل الرطب لانتاج ألياف الكربون:

بعد الانتهاء من تحضير محلول الغزل (PAN-DMF) كما تم الايضاح سابقا، يكون جاهزا للسكب بالمكان المخصص له بماكينة الغزل الرطب، حيث يتم ضغطه و تسخينه حتي يكون جاهزا للضخ بحوض التخثر حيث تبدأ الألياف بالتشكل. و اعتمد انتاج ألياف الكربون علي ماكينة غزل رطب تم تصنيعها بشركة (Fourne Polymertechnik GmbH, Germany)، و كما هو موضح بالشكل (1) فانها تشتمل علي مجموعة أجزاء رئيسية منها مضخة محلول الغزل و حوض التخثر و أحواض الغسيل و وحدات للسحب و التنشيط و التجفيف.



شكل (١): ماكينة الغزل الرطب المستخدمة بالبحث والأجزاء الملحقة بها

تم تسخين محلول الغزل حتى درجة حرارة ٧٠ درجة سيليزية و ضغطه كي يكون جاهز للضح، حيث سيتم ضخه من فوهة بها مجموعة من الثقوب، و عدد ثقوب الفوهة هو عدد الألياف التي سيتم انتاجها بالدفعة الواحدة. هذا و قد تم استخدام فوهة ذات ١٠٠٨ ثقب. قطر كل منها ٧٠ ميكروميتر. و يتم غمر تلك الفوهة داخل حوض التخثر، و الذي يحتوي علي محلول به عنصرين فقط هما ١٥% ماء و ٨٥% DMF عند درجة حرارة ٣٠ درجة سيليزية. و نظرا لاختلاف درجة حرارة و تركيز محلول الغزل عن درجة حرارة و تركيز حوض التخثر، و مع بداية عملية ضخ محلول الغزل داخل حوض التخثر، فان ألياف الكربون تبدأ بالتشكل داخل حوض التخثر، و تلك المرحلة هي أولى مراحل عملية الغزل لألياف الكربون حيث يتم انتاجها داخل سائل (وسط رطب)، و لذلك سميت بالغزل الرطب.

و كان هناك العديد من المتغيرات لماكينة الغزل الرطب تم ضبطها جميعا أوتوماتيكيا قبل البدء بعملية الغزل، منها درجة حرارة تانك محلول الغزل و درجة حرارة حوض التخثر و درجات حرارة أحواض الغسيل و سرعة وحدات السحب و درجة حرارة التجفيف و غيرها من المتغيرات. الألياف المنتجة يتم تجفيفها بالمراحل النهائية في ما يعرف بدولاب التجفيف عند درجة حرارة تتراوح ما بين ٤٠ و ٤٥ درجة سيليزية تمهيدا لاستقبال الألياف بشكل نهائي و لفها علي اسطوانات (أكوان) الألياف. تمهيدا للعمليات اللاحقة من تحميص و كربنة للألياف كي تصل الي الشكل النهائي لألياف الكربون.

و تعتبر مرحلة خروج الألياف من حوض التخثر بعد غزلها و سحبها علي وحدات السحب بماكينة الغزل الرطب من أدق المراحل و اكثرها تأثيرا علي الخصائص الميكانيكية للألياف المنتجة، و هو محل اهتمام البحث. لذلك تم استخدام سرعات مختلفة عن السرعة القياسية المعتادة لوحدة سحب الألياف بعد خروجها من حوض التخثر، و تم انتاج أنواع مختلفة من الألياف اعتمادا علي

نسبة الزيادة بمعدل السحب المستخدم، بحيث كانت نسب الزيادة في السحب هي ٢٥% و ٥٠% و ٧٥% و ١٠٠%، بالإضافة الي العينة القياسية التي تم استخدام السرعة القياسية المعتادة لسحب الألياف خلالها، وذلك بهدف المقارنة ودراسة تأثير معدلات السحب المختلفة علي الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون المنتجة. و الجدول (١) يوضح مسميات الألياف المنتجة (A,B,C,D,E) بناء علي نسب السحب المختلفة.

جدول (١) يوضح مسميات العينات محل الدراسة

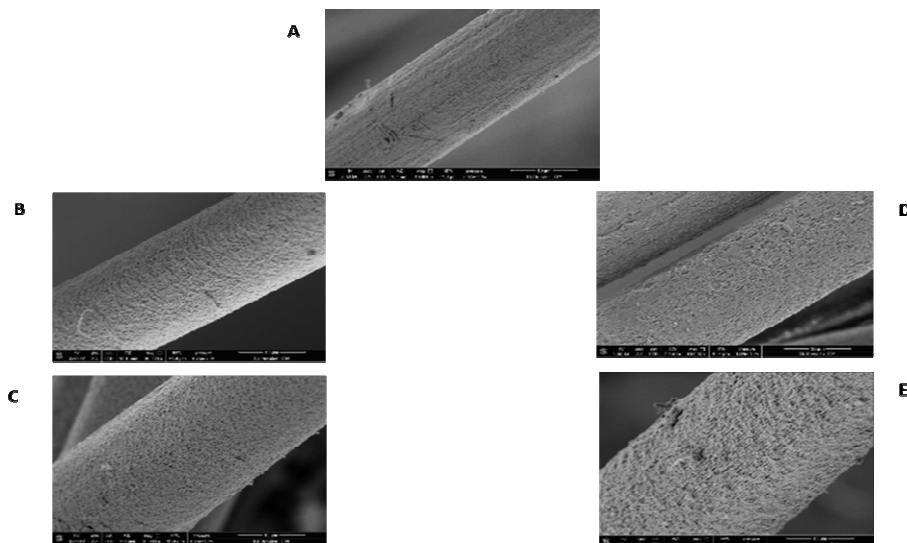
رمز العينة	المكون الأساسي	طريقة الانتاج	نسبة الزيادة في السحب (%)
A (العينة القياسية)	PAN-DMF	الغزل الرطب	-
B	PAN-DMF	الغزل الرطب	٢٥
C	PAN-DMF	الغزل الرطب	٥٠
D	PAN-DMF	الغزل الرطب	٧٥
E	PAN-DMF	الغزل الرطب	١٠٠

بعد الحصول علي الألياف اعتمادا علي تقنية الغزل الرطب السابق توضيحها، كان من الضروري اجراء العديد من الاختبارات العملية لدراسة الخصائص الأساسية لتلك الألياف بعد غزلها مثل طبيعة السطح و القطر و اختبار قوة الشد و الاستطالة، و قد كانت عدد قراءات (تكرار) كل اختبار علي حدة لكل نوع من الألياف الي تم انتاجها عدد ٣٠ قراءة (تكرار) وذلك للحصول علي أدق النتائج. و فيما يلي عرض لنتائج تلك الاختبارات و التي تمثلت في الأتي:

نتائج البحث:

١. طبيعة السطح (Surface morphology):

اعتمادا علي تقنية الميكروسكوب المسحي الالكتروني (SEM) باستخدام جهاز (ESEM (XL 30 SEM, Netherlands) فقد تم تصوير السطح الخارجي للألياف الكربون المنتجة الي دراسة كمية الثقوب أو الفراغات الموجودة علي سطح الألياف و التباين فيما بينها (Seyforth. A. J, 2016)، حيث تعتبر تلك الخاصية من الصفات المحددة لكفاءة الألياف عند استخدامها لأغراض تخزين الطاقة مثل البطاريات و شواحن الأجهزة الالكترونية. فكلما زادت فراغات و وعورة السطح الخارجي لألياف الكربون، كلما زادت قدرتها علي تخزين الطاقة الكهربائية.

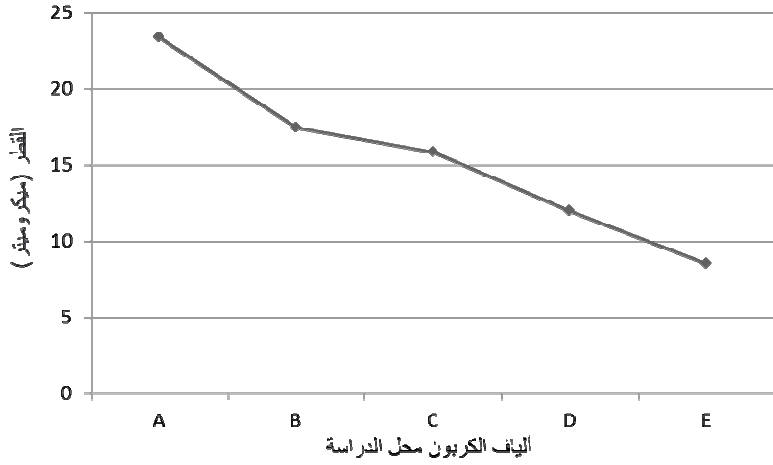


شكل ٢: السطح الخارجي للألياف محل الدراسة بعد اتمام عملية الغزل

و بالنظر الي الشكل (٢) فانه يظهر جليا التباين الواضح بين عينات الألياف المختلفة، ابتداءا بالعيينة القياسية ذات معدل السحب القياسي أثناء عملية الغزل الرطب، مروراً بالعينات التي زادت فيها نسبة معدل السحب تدريجياً من نسبة ٢٥٪ و انتهاءاً بأعلي نسبة في معدل زيادة السحب و هي ١٠٠٪. و بالنظر الي سطح الألياف للعيينة (A) القياسية و التي كان معدل سحب الألياف فيها هو المعدل الطبيعي القياسي، نجد أنه يميل الي السطح المصمت الأملس الخالي من الثقوب أو الفراغات، وذلك مقارنة بباقي العينات الأخرى. أما بالنسبة للعيينة (B) و التي بدأت فيها نسبة معدل السحب بالزيادة بنسبة ٢٥٪ فقد بدأت الثقوب و الفراغات بالظهور علي سطح الألياف مقارنة بالعيينة القياسية. و عند النظر الي سطح الألياف بالعيينة (C) و التي زاد فيها معدل سحب الألياف بنسبة ٥٠٪ فنجد أن نسبة الفراغات قد ارتفعت قليلاً عن العيينة (B). و في حالة العيينة (D) و التي زادت فيها نسب معدل سحب الألياف الي ٧٥٪ فنجد أن نسبة الثقوب و الفراغات قد ارتفعت عن مثيلاتها من العينات السابقة. و عند زيادة نسبة معدل سحب الألياف الي ١٠٠٪ كما هو الحال في العيينة (E) فنجد أن سطح الألياف بتلك العيينة هو الأعلى بنسبة الفراغات و الثقوب علي سطحها مقارنة بباقي العينات.

٢. قطر الألياف (Fiber diameter):

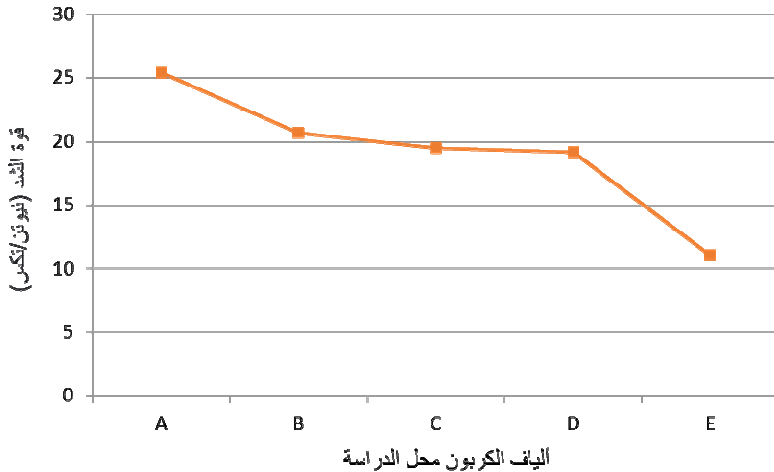
أما بالنسبة لقطر الألياف . فكما يتضح بالشكل (٣) نجد أن قطر الألياف بالعيينة (A) القياسية قد سجل ٢٣,٤١ μm ، ثم أخذ بالتناقص بعد ذلك بالعينات (B) و (C) و (D) مسجلاً ١٧,٤٤ μm و ١٥,٨٧ μm و ١١,٩٨ μm علي التوالي، بينما سجل قطر الألياف في حالة العيينة (E) ذات أعلى معدل سحب للألياف أثناء عملية الغزل الرطب أقل قيمة بين العينات و هي ٨,٤٩ μm . أي أن قطر ألياف الكربون قد استمر بالتناقص مع زيادة نسبة معدل سحب الألياف تدريجياً.



شكل ٣: تأثير زيادة نسبة معدل سحب الألياف أثناء الغزل على قطر الألياف

٣. قوة شد الألياف (Tensile strength):

تعتبر قوة شد الألياف ومقاومتها للقطع من أهم السمات المميزة لمتانتها، ولا سيما في حالة ألياف الكربون التي تعتبر قوة الشد والمتانة من أهم الخصائص التي تميزها عن غيرها. وفي هذا البحث تم اختبار قياس قوة الشد للعينات المختلفة التي تم إنتاجها من ألياف الكربون محل الدراسة، وذلك باستخدام جهاز (FAVIMAT, Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG, Germany) لقياس قوة الشد للألياف بشكل فردي طبقاً للمواصفة القياسية (DIN DIN EN ISO 5079).

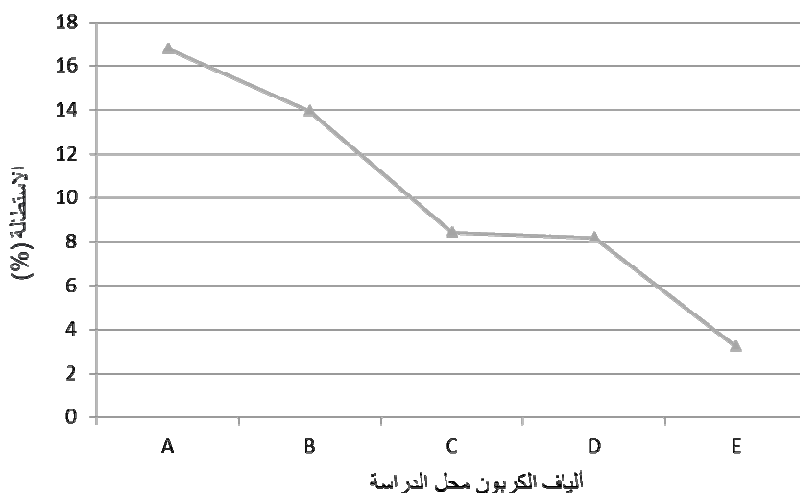


شكل ٤: تأثير زيادة نسبة معدل سحب الألياف أثناء الغزل على قوة الشد للألياف

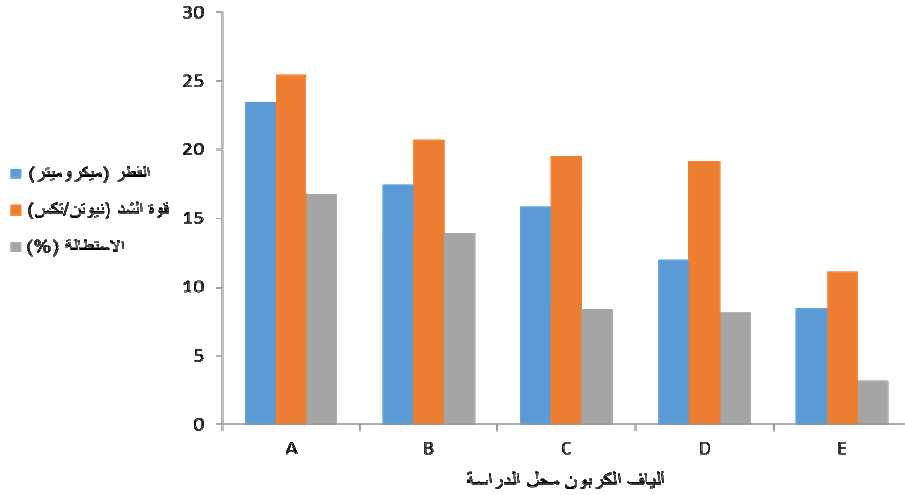
و كما يتضح بالشكل (٤) فإن مقدار قوة الشد للألياف قد اختلف اختلافا واضحا باختلاف العينات فيما بينها، فقد سجلت العينة (A) القياسية أعلى قيمة لقوة الشد مقارنة بباقي العينات محل الدراسة بقيمة ٢٥.٤٢ نيوتن/تكس، و سجلت العينة (E) ذات أعلى نسبة معدل سحب للألياف أثناء الغزل الرطب بقيمة ١١.١١ نيوتن/تكس. في حين سجلت العينات (B) و (C) و (D) قيما متفاوتة لقوة الشد وهي علي الترتيب ٢٠.٧٠ نيوتن/تكس و ١٩.٥١ نيوتن تكس و ١٩.١٧ نيوتن/تكس. ما يعني تناقص قوة الشد بزيادة نسبة معدل سحب الألياف في مرحلة الغزل الرطب.

٤. استطالة الألياف (Elongation):

تعتبر خاصية استطالة الألياف خاصية ملازمة لقوة الشد، و لذلك تم اختبار نسبة الاستطالة للألياف محل الدراسة بنفس جهاز قياس قوة الشد السابق ذكره و بنفس المواصفة القياسية. و يظهر الشكل (٥) أن العينة (A) القياسية قد سجلت أعلى نسبة استطالة (١٦.٧٨٪)، و بدأت نسبة الاستطالة بالتناقص تباعا بالعينات (B) و (C) و (D) تباعا بنسب (١٣.٩٤٪، ٨.٤٢٪، ٨.١٧٪) علي التوالي. في حين كانت أقل نسبة استطالة للألياف بالعينة (E) ذات أعلى معدل للسحب أثناء مرحلة الغزل الرطب.



شكل ٥: تأثير زيادة نسبة معدل سحب الألياف أثناء الغزل علي استطالة الألياف



شكل ٦: تأثير الخصائص الميكانيكية لألياف الكربون بزيادة نسبة معدل السحب أثناء الغزل الرطب

و كما يتضح بالشكل (٦) (المجمع بالأعمدة) فإن كل من قوة الشد والاستطالة و قطر الألياف قد تأثروا جميعا سلبيا بزيادة نسبة معدل السحب في مرحلة الغزل الرطب لألياف الكربون، و قد سجلت العينة القياسية التي لم تتعرض لأي زيادة في معدل السحب عن المعدل الطبيعي أفضل النتائج بجميع الاختبارات، كما أنه كان هناك فروق ذات دلالة احصائية بين نتائج العينات المختلفة محل الدراسة أثناء اجراء اختبارات قوة الشد و الاستطالة و قياس قطر الألياف.

مناقشة النتائج:

اتجه بعض المصنعون لألياف الكربون باستخدام تقنية الغزل الرطب الي التلاعب بأحد مراحل الغزل الرطب و هي مرحلة تكون الألياف و خروجها وسحبها خارج حوض التخثر تمهيدا لنقلها الي المراحل اللاحقة للتصنيع، و ذلك بزيادة سرعة وحدات سحب الألياف. و كانوا يهدفون من وراء ذلك الي زيادة طول الألياف عن المعدل الطبيعي أثناء عملية الغزل الرطب و بالتالي الي زيادة الانتاج بشكل عام.

و من الطبيعي أنه بزيادة معدلات السحب أو الشد للألياف و هي مازالت في مرحلة مرنة رطبة أثناء خروجها من حوض التخثر فان ذلك يؤدي الي مطايطتها (stretching) و زيادة طولها النهائي بالفعل. و لكن نتائج البحث أثبتت أن هذا الاجراء كان له بالغ الأثر السلبي علي الخصائص الميكانيكية للألياف المنتجة، و التي تعتبر هي عامل الجذب الأول الذي يميز ألياف الكربون عن غيرها من الألياف عالية الأداء، و بالتالي تفقد الألياف جزء كبير من خصائصها علي حساب زيادة طولها.

و قد استخدم البحث ٤ نسب لمعدلات سحب الألياف أثناء مرحلة الغزل الرطب لها لانتاج ٤ عينات مختلفة من الألياف، بالإضافة الي العينة القياسية ذات معدل السحب الطبيعي الذي تستخدمه ماكينة الغزل الرطب أثناء عملها. و قد أثبتت النتائج أنه بزيادة نسبة معدل السحب

للألياف الكربون أثناء عملية الغزل الرطب بنسب ٢٥% و ٥٠% و ٧٥% و ١٠٠% عن المعدل الطبيعي لسحب الألياف، فإن ذلك يؤثر سلبيا بشكل مباشر علي كل من قوة الشد و الاستطالة و قطر الألياف المنتجة. أي أنه بزيادة نسبة معدل السحب للألياف تتناقص الخصائص الميكانيكية لها، و قد سجل العينة القياسية أعلى قيم للخصائص الميكانيكية مقارنة بباقي العينات. غير أنه كان هناك تحسن ملحوظ بالسطح الخارجي للألياف، حيث زادت الفراغات و الثقوب علي السطح الخارجي للألياف الكربون بزيادة نسبة معدل السحب حيث سجلت العينة ذات معدل سحب ١٠٠% أفضل الأسطح مقارنة بباقي العينات. و ترجع أهمية الفراغات و الثقوب علي السطح الخارجي للألياف الي زيادة كفاءتها في تخزين الطاقة الكهربائية، و استخدامها بصناعة البطاريات.

توصيات البحث:

نظرا لما تمثله ألياف الكربون من أهمية بالغة للعديد من التطبيقات الحياتية، و تعتمد عليها الكثير من الصناعات الخفيفة و الثقيلة، لما لها من خصائص فريدة و متميزة، فإن البحث يوصي بضرورة الاستمرار في كيفية الاستفادة من ألياف الكربون و تطويرها. كذلك يوصي البحث الي أهمية القاء الضوء علي التقنيات المختلفة لانتاج ألياف الكربون بخلاف تقنية الغزل الرطب. و أخيرا يوصي البحث بالسعي دائما الي ترويج و صناعة ألياف الكربون بمنطقة الشرق العربية، لما سيكون له بالغ الأثر الايجابي في اثناء الاقتصاد القومي و فتح فرص عمل جديدة لتشغيل الشباب و الكفاءات المتميزة.

المراجع

1. Almutairi. M. K., Felemban. R. A., Pasha. S. E., Abo Khashaba. N. T., Mubarak. H. I., Yankesa. R. A., Algamdi. A. Y., Bakkar. A. M., Aldouweghri. A. A., Sannan. M. F., Bassad. D. S., Almaghmsi. M. F., Alonazi. M. A., Alruwaili. M. M., Alhamad. H. M. (2018). The effect of different surface treatments of carbon fibers and their Impact on composites. The Egyptian Journal of Hospital Medicine, Vol. 70 (8), 1275-1281.
2. Bijwe. J., Indumathi. J., Rajesh. J. J., Fahim. M. (2001). Friction and wear behavior of polyetherimide composites in various wear modes. Wear Journal, Vol. 249 (8), 715-726.
3. Chowdhury. N., Faysal. GM., Islam. T., Rahman. H., Yeahsmin. F. (2020). A study on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composite. International conference on materials, energy, environment, and engineering (ICMEEE), November 29-30.
4. Dumanlı. A. G., Windle. A. H. (2012). Carbon fibres from cellulosic precursors: a review. Journal of Material Science, Vol.47, 4236-4250.

5. Elzatahry. A. (2014). Polyacrylonitril electrospun nanofiber As a template to prepare NiO nanostructure electrocatalyst. *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 9.
6. Faruk. O., Bledzki. A.K., Fink, H.P. Sain. M. (2012) Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *progress in polymer science journal*, 37, 1552-1596.
7. Hanna. S. B., Yehia. A. A., Ismail. M. N., Khalaf. A. I. (2011). Preparation and characterization of carbon fibers from polyacrylonitril precursors. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, 2074-2083.
8. Huang. Z. M., Zhang. Y. Z., Kotaki. M., Ramakrishna. S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology Journal*, Vol.3 (15), 2223-2253.
9. Kim. K. W., Lee. H.M., Kim. B. S., Hwang. S. H., Kwac. L. K., An. K. H., Kim. B. J. (2015). Preparation and thermal properties of polyethylene-based carbonized fibers. *Carbon Letters Journal*. Vol. 16, No. 1, 62-66.
10. Lee. S., Kim. J., Ku. B. C., Kim. J., Chung. Y. (2011). Effect of process condition on tensile properties of carbon fiber,” *Carbon Letters Journal*, Vol. 12 (1), 26-30.
11. Ogale. A. A., Zhang. M., Jin. J. (2016). *Journal of Applied Polymer Science*, DOI: 10.1002/APP.43794.
12. Park. S. J. (2018). Carbon fibers. Second edition. Springer Series in Materials Science, Vol. 210. ISBN 978-981-13-0537-5.
13. Seyforth, A. J., 2016: Scanning electron microscopy (SEM): An introduction to the use of SEM for characterizing the surface topology and composition of matter with further applications, *Experimental techniques In condensed matter physics*, <https://www.researchgate.net/publication/304247407>, 17.05.2022.
14. Sherif. F. S. New prospects to enhance the commercial and economical status in textile industry. *International Design Journal*, Vol. 6 (1), 141-148.
15. Torokhov. V. G., Chukov. D., Tcherdyntsev. V. V., Sherif. G., Zadorozhnyy. M. Y., Stepashkin. A. A., Larin. I., Medvedeva. E. V. (2022). Mechanical and thermophysical properties of carbon fiber-reinforced polyethersulfone. *Polymers journal*, Vol. 14, 2956. <https://doi.org/10.3390/polym14142956>.
16. Wu. H., Fan. S. W., Yuan. X. W., Chen. L. F., Deng. J. L. (2013). Fabrication of carbon fibers from jute fibers by pre-oxidation and carbonization. *Journal of New Carbon Materials*. Vol. 28 (6), 448-453.

Utilizing of wet-spinning technique to produce carbon fibers and studying of parameters that affect them.

Abstract

Carbon fibers are unique high-performance materials, as they contain at least 90% of carbon, in addition to their outstanding mechanical properties that qualify them to be the first choice for many life applications compared to other high-performance fibers, as they are characterized by high hardness, superior durability, and lightness weight. However, the manufacturers of these fibers resort to some procedures during the production of these fibers using the wet spinning technique in the hope of increasing production and lowering the cost. Therefore, the aim of this research is to highlight this problem, which may have an undesirable effect on the quality and efficiency of the produced carbon fibers, by studying the effect of increasing the withdrawal rate of Polyacrylonitrile fibers (the main source of carbon fibers) on the mechanical properties of the produced fibers. Four percentages were applied to increase the withdrawal rate (25%, 50%, 75%, 100%) in addition to the normal standard rate of withdrawal without any increase.

The results of the research showed that the tensile strength, elongation and fiber diameter were negatively affected by the increase in the percentage of the withdrawal rate of the fibers during wet spinning compared to the standard sample in which the rate of withdrawal was not increased, while the outer surface of the fibers has been improved by increasing the percentage of the withdrawal rate of the fibers compared to the standard sample that did not have an increase in the rate of withdrawal. This means that the procedure of increasing the rate of withdrawal of the fibers is not suitable for applications that require a high rate of strength due to its negative impact on the mechanical properties of the produced carbon fibers, while this procedure is suitable for applications that require a high surface area without the need for strength, as in the case of manufacturing of carbon fibers for energy storage and batteries.