دراسة تأثير بعض عوامل التشغيل على إنتاج الألياف بطريقة الغزل بالطرد المركزي

الباحث: د. محمد ادريس – كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – قسم هندسة الغزل والنسيج

الملخص:

تم في هذه الدراسة البحث في تأثير عوامل التشغيل الرئيسية على إنتاج الألياف من مخلفات البولي ستايرين المعاد تدويرها باستخدام تقنية الغزل بالطرد المركزي. ركز البحث على تحليل آثار كل من السرعة الدورانية لرأس الغزل والمسافة بين المجمع والفوهة على تشكل الألياف وبنيتها. تم تحضير محلول بوليمر بتركيز 12% وزناً من البولي ستايرين مع استخدام الكلوروفورم كمذيب، ومعالجته باستخدام جهاز الغزل بالطرد المركزي المصنَع الموجود في قسم هندسة الغزل والنسيج، مع تغيير السرعات الدورانية من 1000 إلى 5000 دورة في الدقيقة والمسافات بين المجمع وفوهة البثق بمقدار 10 و 15 و 20 سم. أظهرت النتائج أنه تم الحصول على شبكات الألياف المثلى ذات الكثافة والبنية الجيدين عند السرعات الدورانية المتوسطة (حوالي 2000–3000 دورة في الدقيقة) ومسافة بين المجمع والفوهة تبلغ 15 سم. فشلت السرعات الدورانية المنخفضة في بدء تشكل الألياف، بينما أدت السرعات العالية جداً إلى تشكل رذاذ بدلاً من الألياف. تخلص الدراسة إلى أن الغزل بالطرد المركزي هو طريقة مجدية وفعالة لإعادة تدوير نفايات البولي ستايرين إلى شبكات ليفية، حيث تلعب عوامل التشغيل دوراً حاسماً في تحديد جودة الألياف.

الكلمات المفتاحية

الغزل بالطرد المركزي، إعادة تدوير البولي ستايرين، عوامل التشغيل، السرعة الدورانية، مسافة المجمع، الألياف النانوية.

Study the Impact of Some Processing Parameter on Fibers Produced by Centrifugal Spinning

Abstract

This study investigates the impact of key operational parameters on the production of fibers from recycled polystyrene (PS) waste using centrifugal spinning technology. The research focused on analyzing the effects of rotational speed and collector distance on fiber formation and morphology. A polymer solution of 12% wt PS in chloroform was prepared and processed using a custom-built centrifugal spinning device, varying rotational speeds from 1000 to 5000 rpm and collector distances of 10, 15, and 20 cm. Results demonstrated that optimal fiber mats with good density and structure were achieved at intermediate rotational speeds (around 2000-3000 rpm) and a collector distance of 15 cm. Low rotational speeds failed to initiate fiber formation, while very high speeds resulted in spray formation instead of fibers. The study concludes that centrifugal spinning is a viable and effective method for recycling polystyrene waste into fibrous mats, with operational parameters playing a critical role in determining fiber quality.

Keywords

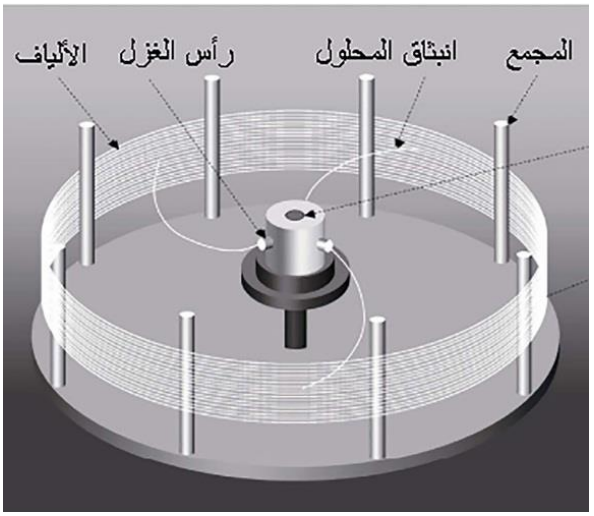
Centrifugal Spinning; Polystyrene Recycling; Operational Parameters; Rotational Speed; Collector Distance; Nanofibers.

1. مقدمة:

الغزل بالطرد المركزي هو تقنية لتصنيع الألياف النانوية والدقيقة، حيث يبثق محلول البوليمر أو المصهور من خلال فتحات دقيقة في رأس دوار باستخدام قوة الطرد المركزي. تتمدّد هذه الانبثاقات من السائل أثناء طيرانها في الهواء لتشكل أليافًا، والتي تُجمع بعد ذلك على مجمع ثابت. تعتمد خصائص الألياف الناتجة مثل(القطر، والانتظام، والمظهرية) بشكل حاسم على عوامل التشغيل [14][1].

1.1. الغزل بالطرد المركزي

يتكون جهاز الغزل بالطرد المركزي الشكل رقم (1) [1]، بشكل رئيسي من رأس غزل يحتوي فوهات، ومحرك عالي السرعة يُستعمل لتدوير رأس الغزل، وجهاز تحكم بالسرعة يُمكن أَن يغير السرعة الدورانية لرأس الغزل، ومجمع للألياف.



الشكل رقم (1): مكونات جهاز الغزل بالطرد المركزي [2]

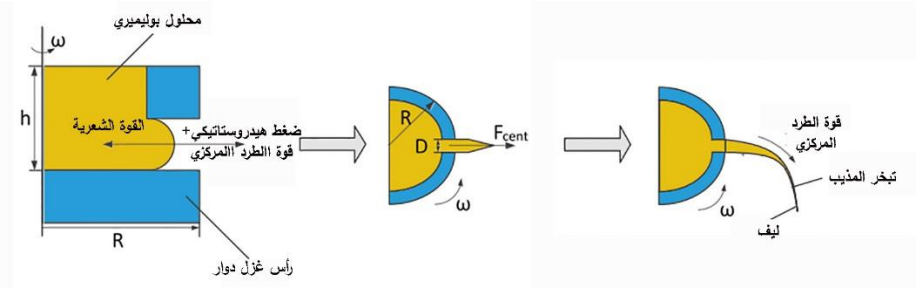
يُمكن أن تُقسم عملية تشكيل الألياف أثناء الغزل بالطرد المركزي إلى ثلاث مراحل:[3]

(i) بدء البثق لدفع تدفق محلول البوليمير خلال الفوهة.

(ii) سحب الانبثاق لزيَادة المنطقة السطحيّة لتدفق البوليمير المدفوع.

(iii) تبخير المذيب لتقوية وتقليص انبثاق البوليمير، الشكل رقم(2).

عُموماً، طالما قوة الطرد المركزية قادرة على التَغَلُّب على التوتر السطحي للمحلول فيُمكن أن يُبثق البوليمير السائل من فوهة رأس الغزل. ثمّ يخضع الانبثاق المحلول لعملية سحب، مصحوبة بتبخر سريع للمذيب، وفي النهاية تتوضع ألياف النانو على المجمع.



الشكل رقم (2): مراحل تشكل الألياف بطريقة الغزل بالطرد المركزي [4].

2.1. العوامل المؤثرة على عملية الغزل بالطرد المركزي

تعتمد طريقة الطرد المركزي على عدة عوامل [1]:(a) خصائص جوهرية لسوائل الغزل، (b)شروط التشغيل، (c)العوامل البيئية. تبين العوامل المؤثرة على عملية الغزل بالطرد المركزي في الجدول (1)

الجدول: -1- العوامل المؤثرة على عملية الغزل بالطرد المركزي[5]

عوامل التشغيل	عوامل تصميم هندسية	خصائص السائل	العوامل المحيطة
السرعة الدورانية	قطر رأس الغزل	الوزن الجزيئي للبوليمير	درجة الحرارة
المسافة بين المجمع والفوهة	قطر وهندسة فوهة البثق	اللزوجة	الرطوبة
	تصميم المجمع	التوتر السطحي	
		تطاير المذيب	

1.2.1 السرعة الدورانية:

تشترك قوتان رئيسيتان في الغزل بالطرد المركزي هما قوة الطرد المركزية (F_{cent})، وقوة الاحتكاك (F_{fri}). يُمكن أن تُحسب هاتين القوتين بالمعادلتين التاليتين:[6]

$$F_{cent} = m\omega^2 D/2 \qquad (1.1)$$

حيث أنَّ : F_{cent}: قوة الطرد المركزي (N)، m: كتلة السائل (kg) ، ω: السرعة الدورانية لرأس الغزل(rad/sec) ، D: قطر رأس الغزل(m) .

$$F_{fri} = -\frac{1}{2}\pi . C . \rho . A . \omega^2 \acute{D}^2 \qquad (1.2)$$

حيث أنَّ :F_{ric}: قوة الاحتكاك(N)، C: معامل احتكاك عددي، ρ: كثافة الهواء(kg/m^3)، A: مساحة المقطع العرضي للانبثاق(m^2)، ω: السرعة الدورانية للانبثاق(rad/sec)، D: قطر مسار الانبثاق(m).

تَصف المعادلة 1.1 القوة التي يواجهها البوليمير السائل ضمن فوهة البثق، بينما تَصف المعادلة 2.1 القوة التي يواجهها انبثاق البوليمير في حالة مسيره [14][1]. من الضَّرُوري التحكم بقوة الطرد المركزية بعناية لأن قوة الطرد المركزية الكافية يُمكن أن تَمنع تشكيل العقد وانقطاع التدفّق [7].

2.2.1 المسافة بين المجمع والفوهة

تُؤثّر المسافة بين الفوهة والمجمع على وقت طيران الانبثاق السائل وتبخر المذيب. بالإضافة أن هذه المسافة تُؤثّرُ على البنية المورفولوجية للألياف الناتجة أيضاً. بينما ينتقل الانبثاق من المهم بأنّ يكون له وقتُ كاف قبل وصُوله إلى المجمع بحيث يتبخر معظم المذيب. إذا كان تبخر المذيب غير كاف قد تشكّل الألياف المجمّعة أفلاماً بدلاً من التركيب الليفي. [1]

3.2.1 هندسة الفوهة

يعتبر تقليل قطر الفوهة طريقة فعّالة في تَخفيض قطر الليف[8]. وجدَ أن أقطار الفوهات الأصغر تُساعد في تَخفيف الانسداد وتشكيل العقد أثناء الغزل. يمكن تفسير تورم البثق

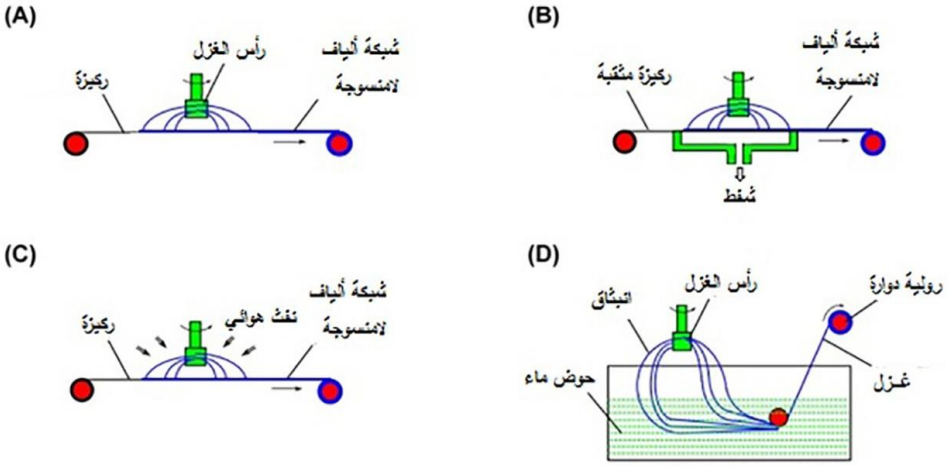
الذي يزيد من قطر الانبثاق، من خلال استرخاء الإجهادِ الناتج عن المكوّن المرن للبوليمير [1].

4.2.1 نظام تجميع الألياف

يمكن أن تستخدم عدّة أنظمة مختلفة لتجميع الألياف في جهاز الغزل بالطرد المركزي. في التصميم المبين في الشكل رقم (4)، تتوضع ألياف النانو على السطح الداخلي لجدار المجمع الدائري المصنوع من معدن أو بلاستيك. إنّ قطر المجمع الدائري مهم لأنه يحدد المسافة بين المجمع والفوهة ويمكن أن يؤثّر على تركيب الألياف الناتجة.

هذا النوع من التصميم مناسب لإنتاج دفعة ألياف، وعادة يمكن رؤيته في الأجهزة المخبرية. في التطبيقات الصناعية من الضروري أن تكون أنظمة تجميع الألياف قادرة على جمع ألياف النانو المغزولة بشكل مستمر.

هذا يمكن أن يحقق باستخدام سير متحرك يوضع تحت رأس الغزل. الشكل رقم (A:4) تساعد الجاذبية في توضع الألياف على السير المتحرك، لإنتاج شبكات ألياف مستمرة من أقمشة غير منسوجة.



الشكل رقم (4): مخططات لـ (A):مجمع الأقمشة غير المنسوجة بمساعدة الجاذبية، (B):مجمع الأقمشة غير المنسوجة بمساعدة قوة شفط الهواء، (C): مجمع الأقمشة غير المنسوجة بمساعدة النفث الهوائي، (D):مجمع غزل بمساعدة حوض ماء للتخثر [7]..

لتحسين كثافة التوزيع والربط لأقمشة اللامنسوج المصنوعة من ألياف مغزولة بالطرد المركزي، يُمكن أن تُقدم قوة شفط الشكل رقم (B:4) وبثق هوائي (هيدروليكي) الشكل رقم (C:4). إذا طبقت قوة شفط فمن الضروري أن تكون السيور مثقّبة مثل الورق أو الأقمشة المنسوجة أو أغشية مثقّبة أخرى لتجميع الألياف.
يوضح الشكل رقم (D:4) مجمع خيط. في هذا التصميم تجمّع الألياف في حمّام ماء. وتجمع غزول الألياف المستمرة بمساعدة رولية دوارة.[9].

5.2.1 التوتر السطحي ولزوجة محلول الغزل

في الغزل الطردي، هناك عاملان أساسيان في محلول البوليمر هما: التوتر السطحي ولزوجة محلول الغزل.[4]

يقلص التوتر السطحي مساحة سطح تيار المحلول، ويحدد شكله النهائي بتفاعله مع قوى الطرد المركزي واللزوجة.[10] يجب أن يكون ضمن نطاق معين، فارتفاعه يسبب تقطع التيار وتكوّن عقد.[1]

تقاوم اللزوجة التغير السريع في شكل التيار، وتساعد على نعومة الألياف.[11] انخفاضها يسبب تقطع التيار أو تناثره،[12] وارتفاعها يعيق خروج المحلول إن لم تكن قوة الطرد كافية. كما تؤثر على معدل التدفق وتزداد مع تبخر المذيب.

يُتحكم باللزوجة عبر تنظيم التركيز (الطريقة الأمثل)، الوزن الجزيئي، أو الحرارة. فزيادة التركيز ترفع اللزوجة وتحسن انتظام الألياف [10] مثلاً، استخدام أكسيد البولي إيثيلين (وزن جزيئي 1,000,000 جم/مول) بتركيز 6٪ وزني يعطي أليافاً بقطر 400–700 نانومتر، وعند 8٪ يصل القطر إلى 900 نانومتر تقريباً.

6.2.1 تبخر المذيب

تُعَرَّفُ قابلية التطاير بأنها قابلية السائل ليتَبخّر في درجة حرارة وضغط الغرفة. يتبخر المذيب أثناء الغزل بالطرد المركزي بمجرد لفظ (قذف) الانبثاق. إذا كانت نسبة تبخر المذيب منخفضة جداً، قد تُحوّلُ الألياف إلى فيلم رقيق عندما تتوضع على المجمع. من ناحية أخرى إذا كان وقت تبخر المذيب قصيراً جداً، فإن عملية الاستطالة قد تكون محدودة، ولن يسمح للسحب الكامل لانبثاق البوليمير وبالتالي يُؤدّي إلى ألياف ذات أقطار كبيرة.[13]

7.2.1 عوامل أخرى

يُمكن أن تُؤثّر العوامل البيئية الأخرى أيضاً على عملية تشكيل ليف بطريقة الطرد المركزي. مع الزيادة في درجة الحرارة تتناقص لزوجة السائل، هذا يُستحب لتخفيض قطر الليف وفي نفس الوقت تشكيل العقد. يُساعد التدفق الهوائي في الغزل بالطرد المركزي على دعم عملية الغزل أيضاً بالإضافة إلى التحكم بقطر الألياف الناتجة [14] . يُمكن أن تُؤثّر العلاقات بين البوليمير والمذيب والملح على خصائص الألياف المغزولة بطريقة الطرد المركزي أيضاً. [15]

2. هدف البحث

دراسة تأثير بعض العوامل التشغيلية الرئيسية على عملية الغزل بالطرد المركزي، وتضم هذه العوامل كل من السرعة الدورانية والمسافة بين الفوهة والمجمع والعمل لتشكيل شبكات ليفية من مخلفات المواد المصنعة من البولي ستايرين (PS) عن طريق إعادة تدوير هذه المواد، وتحويلها إلى شبكات ليفية ذات قيمة مضافة، في إطار تعزيز مبادئ الاستدامة البيئية من خلال تقليل النفايات البلاستيكية وإنتاج مواد قابلة للتطبيق في مجالات متعددة.

3. مواد وطرق البحث

1.3. المواد المستخدمة: تم الحصول على عوادم البولي ستايرين بأشكال متنوعة. تم استخدام الكلوروفورم كمذيب للبوليمير، يبلغ وزنه المولي M=1.474gr/mol، حيث تم شراءه من شركة ScP. استخدمت جميع المواد الكيميائية كما وردت.

2.3.الأجهزة المستخدمة: تم استخدام جهاز بالغزل الطرد المركزي في قسم هندسة الغزل والنسيج في كلية الهندسة الكيميائية والبترولية بجامعة حمص لإنتاج الألياف. يتيح هذا الجهاز غزل محاليل البوليميرات المختلفة إلى ألياف مستمرة تتوضع على المجمع لتشكل شبكة ألياف لا منسوجة تستخدم في تطبيقات خاصة، وذلك من خلال تطبيق قوة الطرد المركزي F_{cent}. (نفذت التجارب عند درجة حرارة المخبر 22^oc).

يتألف الجهاز من مكونين أساسيين هما: رأس الغزل والمجمع. الشكل رقم (1)
تركب فوهات بثق على الجدار الجانبي لحجرة رأس، مع إمكانية تركيب أكثر من نموذج للإبر بحيث يمكن تغيير قطر وطول الإبرة.

يتألف رأس الغزل من حجرة وفوهات بثق تركب على جدار الحجرة الخارجي. تم استخدام ابر ذات قطر 0.6mm بناء على تجارب سابقة في هذا المجال.
يمكن تغيير سرعة رأس الغزل عن طريق وحدة تحكم، ويمكن أن تصل حتى 17000rpm ، وتم في هذا البحث تشغيل الجهاز بسرعات ابتداءً من 1000rpm وحتى 5000rpm لاختبار إمكانية إنتاج الألياف.

المجمع: هو عبارة عن صفائح معدنية تتوضع على محيط دائرة مركزها هو محور المحرك. يمكن تغيير المسافة بين رأس الإبرة والمجمع بمجال: (10-30cm)، وفي هذا البحث تم ضبط مسافة المجمع لتبلغ 10 cm – 15 –20 .

3.3. التجارب العملية

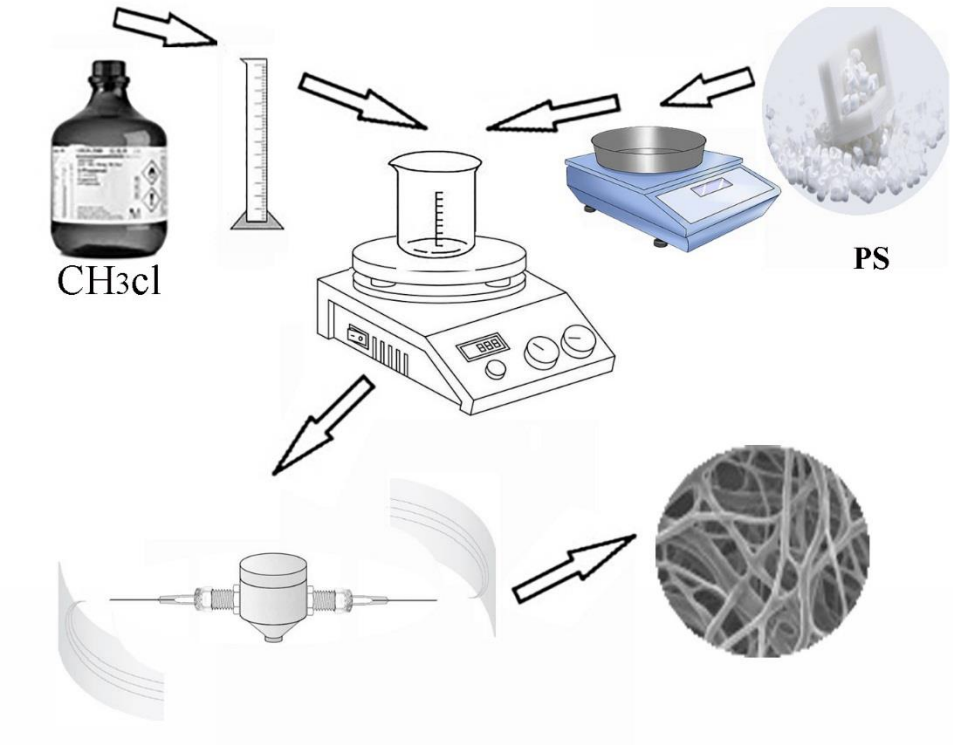
1.3.3. تحضير محلول الغزل: تم تحضير محلول بوليمر بتركيز12%wt باستخدام الكلوروفورم كمذيب بسبب درجة تطايره المرتفعة حيث تبلغ درجة غليانه $64c^o$، وتبلغ قيمة ضغط بخاره 25.9 Kpa عند الدرجة $25c^o$. الشكل رقم (8)
لم تلزم عملية تسخين أثناء التحضير، فقط قمنا بالتحريك لمدة 30min بسرعة 600rpm.

4. النتائج ومناقشتها:

1.4. تأثير عوامل التشغيل على إنتاج الألياف:

هناك العديد من العوامل التي تؤثر على جودة وكمية الألياف في تقنية الطرد المركزي، تتضمن هذه العوامل سرعة الدوران، وقطر الإبرة، والمسافة بين طرف الإبرة والمجمع، وتركيز البوليمر والتوتر السطحي [16][17].

حتى تخرج الألياف من طرف الإبرة تحت تأثير قوة الطرد المركزي الناتجة عن المحرك الدوار. يجب أن تكون قوة الطرد المركزي الناتجة عن المحرك أكبر من التوتر السطحي للمحلول. لذلك، تتطلب المحاليل المختلفة قوة طرد مركزي مختلفة لإنتاج الألياف اعتماداً على لزوجة المحلول.



الشكل رقم (8) تحضير المحلول البوليميري ومن ثم عملية الغزل لألياف البولي ستايرين

استخدمنا في هذه الدراسة الكلوروفورم لإذابة البولي ستايرين لتجنب استخدام المذيبات الباهظة الثمن والخطيرة. في عملية إنتاج الألياف يتبخر الكلوروفورم عندما يخرج من طرف الإبرة نحو المجمع.

في هذه الدراسة تم تحضير تركيز 12%wt من محلول البولي ستايرين وهو تركيز عالي، حيث أنه من مزايا طريقة الغزل بالطرد المركزي إمكانية تشغيل محاليل عالية التركيز، وتم استخدام إبرة برأس قطره 0.6 mm، ولتصبح عوامل تشغيل الجهاز المدروسة للحصول على ألياف هي السرعة الدورانية لرأس الغزل والمسافة بين رأس الإبرة والمجمع.[18]
مجال السرعة الدورانية لرأس الغزل من 1000rpm وحتى 5000rpm بزيادة قدرها 1000 كل تجربة، أما المسافة بين رأس الإبرة والمجمع فتراوحت من: (10 – 15 – 20 cm)، تم تبديل الإبر بعد كل تجربة.

1.1.4. تأثير السرعة الدورانية على إنتاج الألياف:

أظهرت النتائج وجود علاقة غير خطية بين السرعة الدورانية وجودة الألياف المنتجة، حيث أن لكل سرعة تأثير مختلف.
فعند السرعات المنخفضة (1000–3000 دورة/دقيقة) تشكلت شبكات ليفية، حيث كانت أفضل النتائج عند 2000 و3000 دورة/دقيقة، وذلك عند مسافة بين الفوهة والمجمع15cm.
ويعزى ذلك أنه هذه السرعات، تكون قوة الطرد المركزي كافية للتغلب على التوتر السطحي للمحلول وبدء عملية بثق الألياف، كما أنها تمنح الوقت الكافي لتبخر المذيب (الكلوروفورم) أثناء طيران الألياف نحو المجمع، مما يسمح بتصلب الألياف بشكل مناسب [1][19].

أما عند السرعات العالية (4000 دورة/دقيقة فأعلى)، كانت النتيجة فشل في تشكيل الألياف وتحول المنتج إلى رذاذ (Spray).
تفسير ذلك أن الوقت الذي يقضيه الخيط في الهواء (وقت الطيران) قبل الوصول إلى المجمع يصبح قصيراً جداً. هذا لا يسمح بتبخر كافي للمذيب، فيصل المحلول لا يزال رطباً إلى المجمع ويتجمع على شكل قطرات أو رذاذ بدلاً من أن يتصلب على شكل ألياف منفصلة [7].

2.1.4. تأثير المسافة بين الفوهة والمجمع على إنتاج الألياف:

بينت النتائج أن المسافة بين المجمع والفوهة هي عامل حاسم في عملية تصنيع الألياف.

فعند المسافة القصيرة (10 سم) تم إنتاج شبكات ليفية ذات كثافة ضعيفة إلى متوسطة فقط. ويفسر ذلك بأن وقت الطيران القصير جداً لا يسمح بتبخر كامل للمذيب ولا يمنح الليف وقتاً كافياً للاستطالة الكاملة، مما ينتج أليافاً ذات كثافة وجودة غير مثلى[16][7].

أما عند المسافة المتوسطة (15 سم) تم إنتاج أفضل شبكات ليفية ذات كثافة جيدة. لأن هذه المسافة توفر التوازن الأمثل. فهي تمنح الوقت الكافي لتبخر معظم المذيب، مما يضمن تصلب الألياف بشكل جيد، وفي نفس الوقت تسمح بقوى استطالة كافية للحصول على ألياف دقيقة [7].

وعند المسافة الأطول (20 سم) حصل تراجع في جودة الشبكات الليفية مرة أخرى.

حيث أنه من الممكن أن تؤدي المسافة الطويلة جداً إلى اضطراب في مسار الألياف أو فقدان التحكم في اتجاهها، مما يؤثر سلباً على انتظامية وكثافة الشبكة المتكونة على المجمع [1].

تم تقييم كثافة الشبكات على أساس وزني، حيث تم وزن قطعة من كل شبكة من الشبكات الناتجة بأبعاد 1.5*5cm، وصنفت إلى شبكة ذات كثافة ضعيفة لا يمكن وزنها بسبب ضغفها، وكثافة متوسطة كان متوسط وزن العينات 0.0134gr، وكثافة جيدة كان متوسط وزن العينة 0.04576gr. تم إدراج نتائج تجارب تشغيل عوادم البولي ستايرين على جهاز الغزل بالطرد المركزي في الجداول التالية:

الجدول:(2) : نتائج تشغيل محلول بوليمير بتركيز 12% wt، المذيب كلوروفورم، المسافة بين الإبرة والمجمع 10cm

السرعة الدورانية rpm	عدم تشكل شبكة (رذاذ)	شاشة ذات كثافة ضعيفة	شاشة ذات كثافة متوسطة	شاشة ذات كثافة جيدة
1000		☑		
2000			☑	
3000		☑		
4000	☑			
5000	☑			

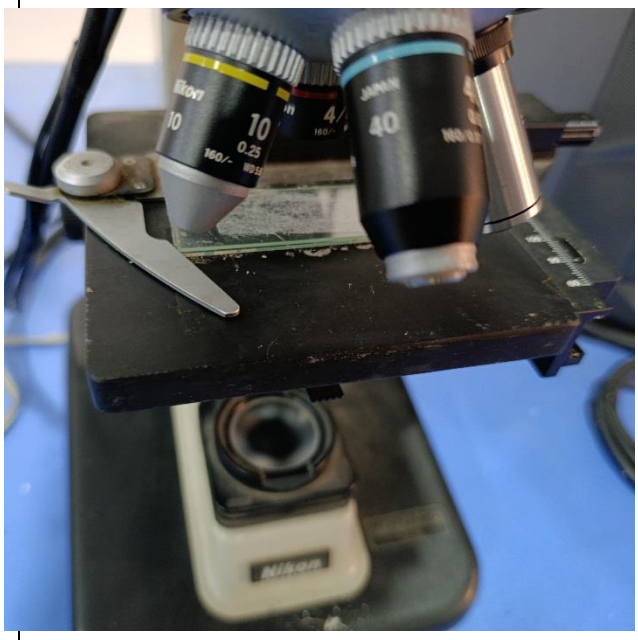
الجدول:(3) : نتائج تشغيل محلول بوليمير بتركيز wt 12%، المذيب كلوروفورم، المسافة بين الإبرة والمجمع 15cm

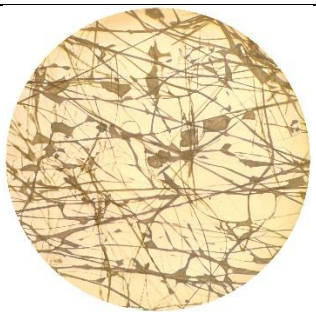
السرعة الدورانية rpm	عدم تشكل شبكة (رذاذ)	شاشة ذات كثافة ضعيفة	شاشة ذات كثافة متوسطة	شاشة ذات كثافة جيدة
1000		☑		
2000				☑
3000			☑	
4000			☑	
5000		☑		

الجدول: (4) : نتائج تشغيل محلول بوليمير بتركيز wt 12%، المذيب كلوروفورم، المسافة بين الإبرة والمجمع 20cm

السرعة الدورانية rpm	عدم تشكل شبكة (رذاذ)	شاشة ذات كثافة ضعيفة	شاشة ذات كثافة متوسطة	شاشة ذات كثافة جيدة
1000		☑		
2000			☑	
3000			☑	
4000		☑		
5000		☑		

يوضح الشكل رقم (9) شبكات ألياف البولي ستايرين تحت المجهر الضوئي المنتجة باستخدام تقنية الطرد المركزي.





A

B

الشكل رقم (9) شبكات ألياف البولي ستايرين تحت المجهر الضوئي

من خلال المجهر الضوئي لوحظ أن الشبكات الليفية الناتجة تتكون من ألياف البولي ستايرين ذات لون أبيض متباينة بالقطر والكثافة، حيث تم الحصول على شبكات ذات كثافة جيدة كما هو واضح في الشكل رقم (9-A)، وشبكات ذات كثافة متوسطة كم في الشكل رقم (9-B). عند السرعة الدورانية المنخفضة لا يتم تشكيل ألياف لأن قوة الطرد المركزي الناتجة غير كافية للتغلب على التوتر السطحي للمحلول من أجل تحقيق شرط الانبثاق، وهكذا مع الزيادة في سرعة رأس الغزل تزداد قوة الطرد المركزية المطبقة على انبثاق السائل وبالتالي ينتج كتلة أكبر من الانبثاق السائل وتزداد الإنتاجية وتزداد استطالة الألياف، ولكن في حال كانت السرعة الدورانية عالية جداً لا يتم الحصول على ألياف لأن الانبثاق السائل يصل إلى المجمع دون تبخر المذيب الذي لم يحصل على وقت كاف ليتبخر[1][19].

5. الاستنتاجات والتوصيات:

تم إنتاج شبكات ليفية من مخلفات البولي ستايرين بواسطة جهاز الغزل بالطرد المركزي. وقد وجد أنه يمكن الحصول على شبكات ليفية ذات كثافة جيدة عند تركيز البوليمر 12%wt وباستخدام الكلوروفورم كمذيب، وإبرة ذات قطر فوهة: (0.6 mm)، إن تطبيق سرعة بين 3000-4000rpm أدى إلى إنتاج شبكات ألياف ذات كثافة جيدة وذلك عند مسافة بين المجمع والفوهة 15cm.

نوصي بدراسة أقطار الألياف ونفوذية الشبكات للماء والهواء، وتقييم إمكانية تطبيق شبكات ألياف البولي ستايرين الناتجة كوسيط لتصفية المياه.[18]

6. المراجع الأجنبية:

[1] Li, Z., Wang, Y., & Chen, H. (2025)- "Optimization of Centrifugal Spinning Parameters for Recycled Polystyrene Nanofibers Using Response Surface Methodology (RSM)". Journal of Polymer Engineering, 45(2), 112-125

[2] Chen.B, Wang. J, Jiang. Y, Zhou. H, Liao. C, Zhang. X, Kan. Y, NI Dewei, & Dong. S. (2020)- Stable Zirconium Carbide Fibers Fabricated by Centrifugal Spinning. Technique.Journal of Inorganic Materials,Vol. 35 No. 12.

[3] Zhang. Z, Sun. J. (2017)- Research on the development of the centrifugal spinning. MATEC Web of Conferences, 95, 07003.

[4] Abdulhussain, R., Al-Sabbagh, B., & Al-Najar, R. (2025)- "A Comprehensive Review on Centrifugal Spinning: From Polymer Solution to Advanced Applications". Polymer Reviews, 65(1), 45-88

[5] Badrossamay,M. R., McIlwee, H. A., Goss, J. A., & Parker, K. K. (2010)- Nanofiber assembly by rotary jet-spinning. Nano Letters, 10(6), 2257–2261.

[6] Huang, C., Chen, R., & Ke, Q. (2021)- Jet behavior and fiber morphology in centrifugal spinning: A review. Physics of Fluids, 33(7), 071701

[7] Tucker, N., Stanger, J. J., Staiger, M. P., Razzaq, H., & Hofman, K, (2012)- The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 7(2), 63-73.

[8] Zhao, Y., Liu, F., & Zhang, T. (2023)- "The Role of Solvent Evaporation in Centrifugal Spinning of Polystyrene: A Numerical and Experimental Study". Chemical Engineering Science, 270, 118-132

[10] Lu.Y, Li.Y, Zhang.S, et al. (2013)- Parameter study and characteriza-tion for polyacrylonitrile nanofibers fabricated via centrifugal spinning process. Europ Polym J; 49(12): 3834-3845.

[11] Fang.Y, Dulaney.AR, Gadley.J, et al.(2016)- A comparative param-eter study: controlling fiber diameter and diameter distri-bution in centrifugal spinning of photocurable monomers. Polymer; 88: 102-111.

[12] Natarajan.TS and Bhargava.P.(2018)- Influence of spinning pa eters on synthesis of alumina fibres by centrifugal spin Ceramics . Int; 40(10): 11644-11649

[13] Dosunmu, O. O., Chase, G. G., Kataphinan, W., & Reneker, D. H. (2006)- Electrospinning of polymer nanofibres from multiple jets on a porous tubular surface. Nanotechnology, 17(4), 1123.

[14] Lozano, K., & Sarkar, K. (2009)- Superfine Fiber Creating Spinneret and Uses Thereof. U.S. Patent No. US20090280325A1.

[15] Wang, X., et al. (2019)- Effects of humidity on the morphologies of PMMA nanofibers during centrifugal spinning. Polymer Testing, 75, 119-125

[16] Rashid, M. M., & Alam, A. Z. (2023)- "Parametric Optimization for Uniform Nanofiber Production from Waste Polystyrene Using Centrifugal Spinning". Journal of the Textile Institute, 114(11), 1678-1689

[17] Xu, Z., Li, J., & Zhou, H. (2022)- Modeling and optimization of centrifugal spinning parameters for polyvinylpyrrolidone (PVP) nanofibers using response surface methodology. Chemical Engineering Research and Design, 177, 640-651.

[18] Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2024)- "Recycling of Expanded Polystyrene Waste into Fibrous Mats via Centrifugal Spinning for Oil Spill Cleanup". Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(3), 112-123

[19] Singh, A., Sharma, V., & Gupta, R. (2024)- "Effect of Rotational Speed and Collector Distance on Morphology of PS Fibers from Waste Material". Materials Today: Proceedings, 98, 234-240

6. المراجع العربية:

[9] IDREES.M,(2020). A Study of Manufacturing a Centrifugal Spinning Device for the Production of Synthetic Fibres. Homs uni.