دراسة التأثير الهيدروليكي للزوجة المحلول البوليميري على إنتاجية جهاز الغزل بالنفخ

الدكتور: عدنان الشيخ حمود الهندسة الكيميائية والبترولية جامعة البعث

ملخص

تركز هذا البحث على دور اللزوجة في تقنية الغزل بالنفخ وهي إحدى الطرق الحديثة في إنتاج شبكات غير منسوجة من الألياف النانوية و التي يتم العمل على تطويرها حالياً في مخابرنا المحلية . حيث تعتمد هذه التقنية على استثمار المبادئ الهندسية لعلم جريان الموائع . فعندما يخرج تيار الغاز عالي الضغط من الفوهة الخارجية ينخفض الضغط مما يؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية للتيار وبالتالي زيادة سرعة الغاز، هذه السرعة تؤدي إلى نشوء قوة قص هي المسؤولة عن تشويه المحلول البوليميري المتدفق من الفوهة الداخلية وتحول القطرة إلى شكل مخروطي، وبعد التغلب على قوى الشد السطحي يبدأ المحلول بالتطاير ويتبخر المذيب وتحدث استطالة تؤدي إلى تشكل الألياف .

نظراً للشروط والعمليات الهيدروليكية المختلفة التي تتحكم بعمل هذه التقنية، تم في هذا البحث تسليط الضوء على السلوك الريولوجي للمحلول البوليميري ومدى تأثيره على إنتاجية جهاز الغزل بالنفخ عند قيم مختلفة لضغط الهواء الخارج من الضاغط ضمن مجال (1–4) بار، وذلك باستخدام محلول بوليميري من بولي لاكتيك أسيد PLA بتراكيز مختلفة (5–7–10–12) wt%. حيث تمت دراسة العلاقة بين تركيز المحلول ولزوجته، إضافة إلى دراسة العلاقة بين قيم اللزوجة وإنتاجية الجهاز عند كل قيمة من قيم الضغط. هذا وقد أظهرت نتائج البحث أن زيادة تركيز المحلول يؤدي إلى زيادة لزوجته وذلك عند درجة حرارة المخبر، وأنه بانخفاض قيمة لزوجة المحلول بالتزامن مع زيادة ضغط الهواء الخارج من الضاغط يزداد تدفق المحلول البوليميري مما يحسّن بشكل كبير من أداء العملية، ويزيد من إنتاجية الشبكات المغزولة على جهاز الغزل بالنفخ.

الكلمات المفتاحية: غزل بالنفخ ، ضغط ، هيدروليك ، لزوجة ، بوليمير

Study of the hydraulic effect of viscosity of polymeric solution on the productivity of the blowing spinning device

This research focused on the role of viscosity in blow spinning technology, which is one of the modern methods in the production of non-woven networks of nanofibers, which are currently being developed in our local laboratories. This technique is based on the investment of the engineering principles of fluid flow science. When the high-pressure gas stream comes out of the outer nozzle, the pressure decreases, which leads to an increase in the kinetic energy of the current and thus an increase in the speed of the gas, this speed leads to the emergence of a shear force that is responsible for deforming the polymeric solution flowing from the inner nozzle and turning the drop into a conical shape, and after overcoming the surface tensile forces, the solution begins to volatilize and the solvent evaporates and elongation occurs that leads to the formation of fibers.
Due to the different hydraulic conditions and processes that control the work of this technique, in this research the rheological behavior of the polymeric solution and its effect on the productivity of the blow spinning device at different values of the air pressure leaving the compressor within the range of (1-4) bar, using a polymeric solution of polylactic acid PLA in different concentrations (5-7-10-12) wt%. The relationship between the concentration of the solution and its viscosity was studied, in addition to studying the relationship between the viscosity values and the productivity of the device at each pressure value. The results of the research showed that increasing the concentration of the solution leads to an increase in its viscosity at the temperature of the laboratory, and that by decreasing the value of the viscosity of the solution in conjunction with the increase in the air pressure coming out of the compressor, the flow of the polymeric solution increases, which greatly improves the performance of the process, and increases the productivity of the spunbond meshes on the blow spinning device.

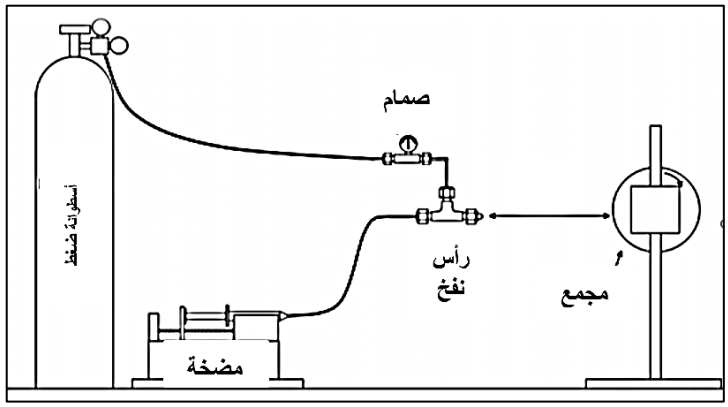
Keywords: blow spinning, pressure, hydraulics, viscosity, polymer

1- هدف البحث :

الهدف من هذه الدراسة تحديد قيم اللزوجة الأمثل لغزل المحلول البوليميري بالنفخ، وإيجاد العلاقة بينها وبين تركيز المحلول، وتأثيرها على إنتاجية جهاز الغزل بالنفخ لإنتاج أقمشة غير منسوجة مكونة من ألياف نانوية عند ضغوط هواء مختلفة.

2- مقدمة :

تتيح تقنية الغزل بالنفخ solution blow spinning (SBS) فرصة نفخ محلول البوليمير بشكل جيد وتحويله إلى شبكات مكونة من ألياف نانوية. حيث يعتمد نفخ المحلول على السرعة العالية للهواء المضغوط مما يتسبب في تمدد سريع وتبخر للمذيب انطلاقاً من فوهة المحلول البوليميري. ويمكن لهذه الطريقة أن تكون قابلة للتطوير للوصول إلى الإنتاج التجاري [1,2].



الشكل (1): مبدأ تقنية النفخ

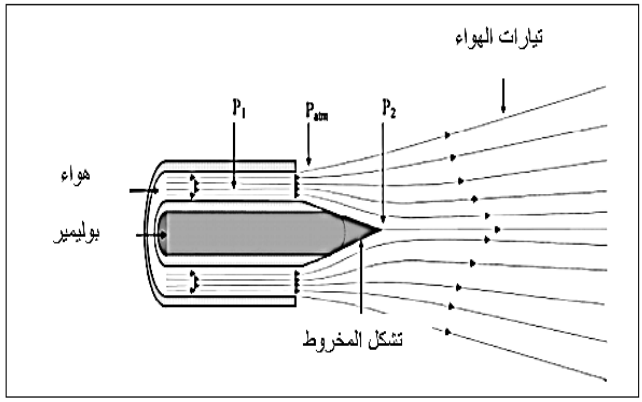
تعتمد نظرية الغزل بالنفخ على مبدأ برنولي الذي يتم فيه تحويل التغيرات في الضغط إلى طاقة حركية كما تظهر في معادلة أيلر[3] :

$$\frac{1}{2}.\frac{\partial V^2}{\partial l}+\frac{\partial V}{\partial t}=-g\frac{\partial z}{\partial t}-\frac{1}{\rho}.\frac{\partial p}{\partial l}$$

التي تسمى بعد المكاملة بمعادلة بيرنولي للطاقة :

$$\frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + g.z = const$$

عندما يخرج تيار الغاز عالي الضغط من الفوهة الخارجية ، ينخفض الضغط مما يؤدي إلى زيادة الطاقة الحركية للتيار وتؤدي إلى زيادة سرعة الغاز . هذه الزيادة في السرعة تعزز انخفاض الضغط في مركز فوهة البثق ، مما يخلق قوة دافعة مسؤولة عن تسارع محلول البوليمر. كما تؤدي السرعة العالية للغاز إلى نشوء قوى قص ستكون قادرة على التغلب على قوى التوتر السطحي و مسؤولة عن تشويه المحلول الذي يخرج من الفوهة الداخلية الى شكل مخروطي و يبدأ المحلول بالتطاير ويتبخر المذيب وتتشكل الألياف . [3]



الشكل (2): مبدأ بيرنولي المعتمد في تقنية الغزل بالنفخ

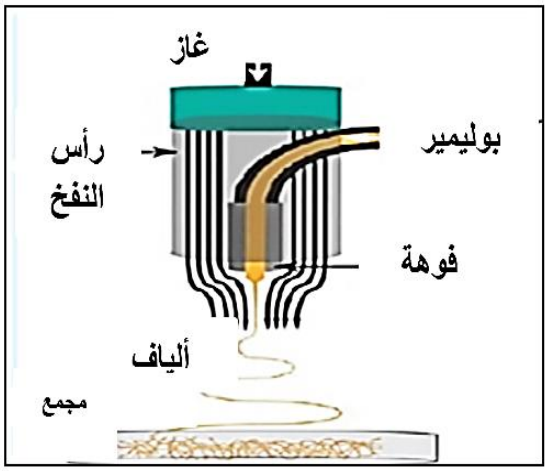
إن تقنية الغزل بالنفخ توفر فرصًا للتوسع في البحث القائم على علم النانو، إذ إن الجهاز البسيط المطلوب لـ SBS سيسمح للباحثين بالتحقيق في التطبيقات الجديدة للمواد النانوية والمواد الدقيقة. يمكن لـ SBS بشكل عملي إنشاء طلاءات ومنسوجات ومواد خاصة

قابلة للتطوير ذاتيًا . يُعد هذا ابتكارًا ضروريًا لتقديم منتجات مثل الاقمشة الذكية القابلة للارتداء ومواد الرعاية الصحية [4] .

حالياً، يتم تسليط الضوء على مجموعة من التطبيقات التي تتضمن بوليمرات نانوية تم إنشاؤها بواسطة SBS في المواد الحيوية وهندسة الأنسجة والمنسوجات والمواد المركبة. ومن المتوقع أن تكون SBS وسيلة لاستكشاف مجموعات جديدة من البوليمرات والمذيبات التي لا يمكن الوصول إليها في الغزل الكهربائي ، وتقنية لإنتاج مواد ثقيلة قابلة للاستخدام بشكل ملائم [4] .

- **حركية الهواء الحامل للبوليمير :**

يتكون جهاز الغزل بالنفخ بصورة عامة من فوهة يتم من خلالها حقن محلول البوليمير مع تيار من الغاز المتسارع والذي يخرج من مصدر للغاز المضغوط – الهواء مثلاً (وهو الغاز المستخدم في دراستنا) – ومجهز بمنظم ضغط، ومحقنة، ومضخة للتحكم في معدل الحقن، رأس النفخ يتكون من فوهات متحدة المركز، ومجمع مع سرعة دوران يمكن التحكم فيها [2].



الشكل (5): نموذج رأس نفخ [5]

بما أن الهواء نوع من الموائع النيوتونية ، يتم استخدام معادلة المائع النيوتوني في نموذج حقل التدفق[5] . إنّ عملية دفع البوليمير بالهواء المضغوط أثناء الغزل بالنفخ تعتبر بمثابة تدفق ثنائي الطور ويكون على مرحلتين .

يعمل تدفق الهواء بالقرب من رأس النفخ كقوة موجبة (للأسفل) على المحلول البوليميري، ولكن في الجانب الآخر من الرأس تكون القوة سالبة الشكل (6).

$$F_r = \frac{\pi}{4} D^2(\tau_y - \tau_x) \quad \ldots\ldots(4)$$

حيث :

τ_y إجهاد الشد المحوري للبوليمر τ_x إجهاد الشد العرضي للبوليمر

D قطر الفوهة F_r قوة دفع الهواء.

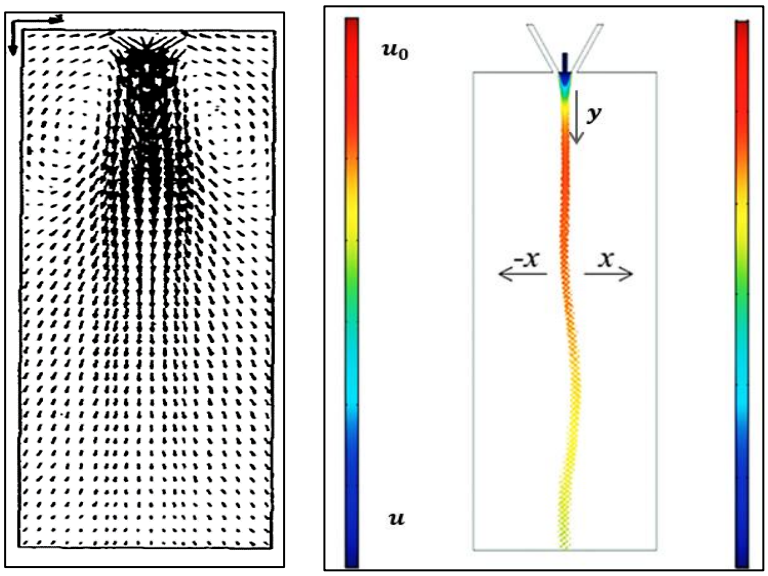
لوحظ من مركبات السرعة على محوري x و y أنّ V_y أعلى بكثير من V_x وتتفاوت في أنماط مختلفة. حيث تبدأ السرعة V_y بالحد الأقصى وتتناقص مع تقدم المسافة، أما V_x تتأرجح بين القيم السالبة والموجبة مما يشير الى عدم الاستقرار وهذا ما يسمى whipping (حركة السوط)، وينتج عنها إزاحة جانبية وهذه الإزاحة تعرف بالسعة.

تنتج السعة (الإزاحة) بسبب تداخل عدد من المسارات المتتالية للهواء الحامل للبوليمير، وتؤدي المسارات المنفوخة المتداخلة إلى تحويل القطرة إلى شكل مدبب مخروطي بعد التغلب على التوتر السطحي و يبدأ بعدها تبخر المذيب بالتزامن مع حدوث استطالة للقطرة، ثم ترسب الألياف المتشكلة على سطح التجميع.

إن جريان الهواء يحدده رقم رينولدز وفق:

$$Re = \frac{D(V_y - V_x)}{\nu_u} \ldots\ldots\ldots (5)$$

حيث : ν_u اللزوجة الحركية للهواء .



الشكل (6): ظاهرة السوط أثناء تدفق الهواء [7،6]

- **تحليل الضاغط:**

إن تدفق غاز من خزان إلى الوسط الخارجي عبر فوهة يعتمد على فرق الضغط بين طرفي الفوهة، أو على النسبة بين الضغط الخارجي و ضغط الخزان p_0/p_b، ويمكن أن

تتغير هذه النسبة بتغير أحدهما أو كلاهما إن الجريان عبر الفوهات يكون جريان تحت صوتي إذا كان الضغط الخارجي أصغر من الضغط الحرج p_{Cr} و تسمى الفوهة التي يصل فيها رقم ماخ إلى القيمة 1 بالفوهة المخنوقة ويصل التدفق الكتلي للغاز إلى قيمته العظمى في هذه الحالة. شروط الفوهة المخنوقة [8] :

$$\frac{P_b}{P_0} \leq \frac{P_{cr}}{P_0}$$

$$\frac{P_b}{P_0} \leq \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}}$$

في حالة الهواء فإن K = 1.41 ويكون :

$$\frac{P_{cr}}{P_0} = 0.528$$

وفي حالة جريان الهواء من الضاغط جرياناً إيزونتروبياً وحيد البعد فإن التدفق الكتلي يعطى:

$$\dot{m}_{max} = \sqrt{\frac{k}{R}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} . A \frac{P_0}{\sqrt{T_0}}$$

حيث: R ثابت الغازات، P_0 ضغط الخزان، T_0 درجة الحرارة في الخزان. ومن أجل غاز معين وفتحة معينة فإن:

$$\dot{m}_{max} = K_1 A. \frac{P_0}{\sqrt{T_0}}$$

في حالة الهواء ثابت الغازات R = 287 j/kg. k فإن:

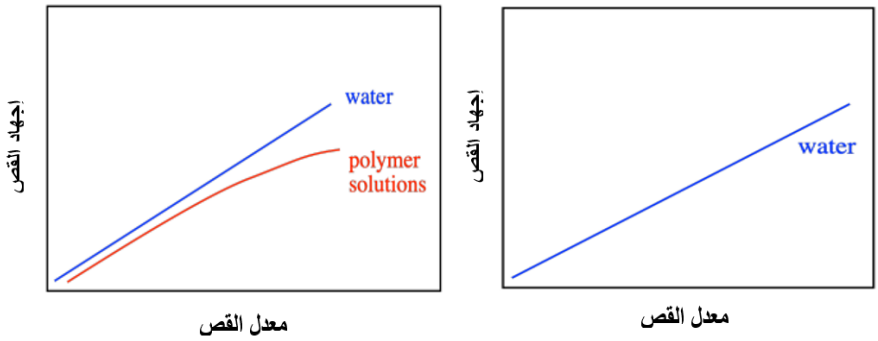
$$\dot{m}_{max} = 0.04 \times \dot{A} \times \frac{p_0}{\sqrt{T_0}} \qquad kg/_S \qquad \ldots\ldots\ldots (6)$$

هذه العلاقة محققة فقط في الفوهة المخنوقة، أي عندما يكون الضغط الخارجي يساوي أو أقل من الضغط الحرج .

- **السلوك الريولوجي للمحاليل البوليميرية :**

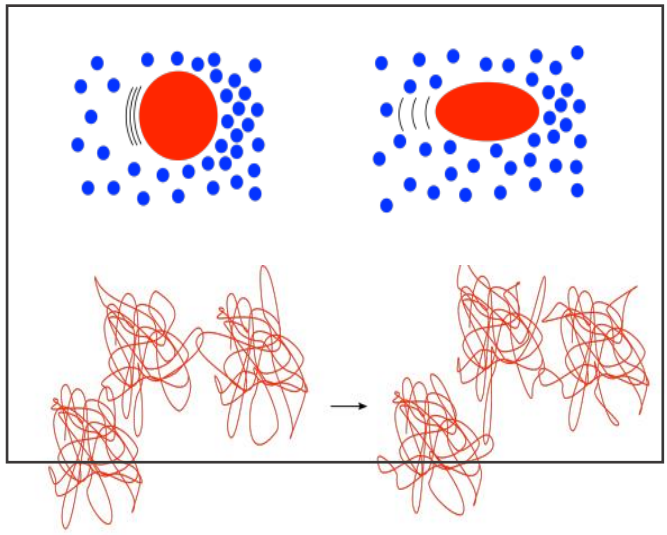
ان دراسة السلوك الريولوجي للسائل هو دراسة تغيرات لزوجته عند الجريان ، بمعنى آخر ماذا يحدث عندما يتعرض المحلول لقوة قص . توضح الدراسات أن إجهاد القص ومعدل القص مرتبطان ارتباطاً مباشراً ، ففي حالة الماء (مثلاً) تكون العلاقة خطية بين إجهاد ومعدل القص. هكذا وصف إسحاق نيوتن سلوك السوائل ، وميل هذا الخط هو لزوجة المحلول .

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu . \frac{du}{dy} \qquad \ldots\ldots \quad (7)$$



الشكل (7): العلاقة بين إجهاد ومعدل القص للماء

في حالة المحلول البوليميري، يميل جزيء البوليمر المنفرد إلى الالتفاف على شكل كرة. وعند تطبيق معدلات قص عالية فإنها تتشوه، مما يجعل المحلول أقل لزوجة. أيضاً يذكر أن البوليمرات تُظهر تشابكاً في السلسلة، خاصة عندما تكون كبيرة جداً، وهذا التشابك يزيد من لزوجة المحلول. وعندما يتم تطبيق إجهاد قص، تبتعد بعض سلاسل البوليمير عن بعضها، لكنها ستُحدث تشابكات جديدة على الفور.



الشكل (8): التغيرات التي تطرأ على بنية البوليميرات أثناء تطبيق القص [3]

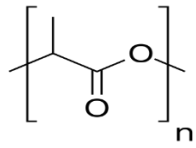
3- المواد والأجهزة :

- **المواد:**

- **بولي لاكتيك أسيد PLA :**

تم في التجارب استخدام محلول من بوليمير بولي لاكتيك أسيد PLA، وهو بوليمير ذو كتلة جزيئية عالية، بنيته التركيبية هي –O–CH–CO–، وهو متعدد إستر أليفاتي، متفكك حيوياً، ويتفكك إلى ماء وثاني أكسيد الكربون. وهو من اللدائن الحرارية. تم الحصول على المادة الصلبة للبوليمير من مادة PLA المستخدمة في الطباعة ثلاثية الأبعاد، وهي عبارة عن بكرة وزنها الصافي 1kg، تحوي شريط ذو قطر 1,75mm، لونه شفاف (CC Transparent)، الكثافة: $1,25\ gr/cm^3$ ، صنع الصين.

صيغته الكيميائية:



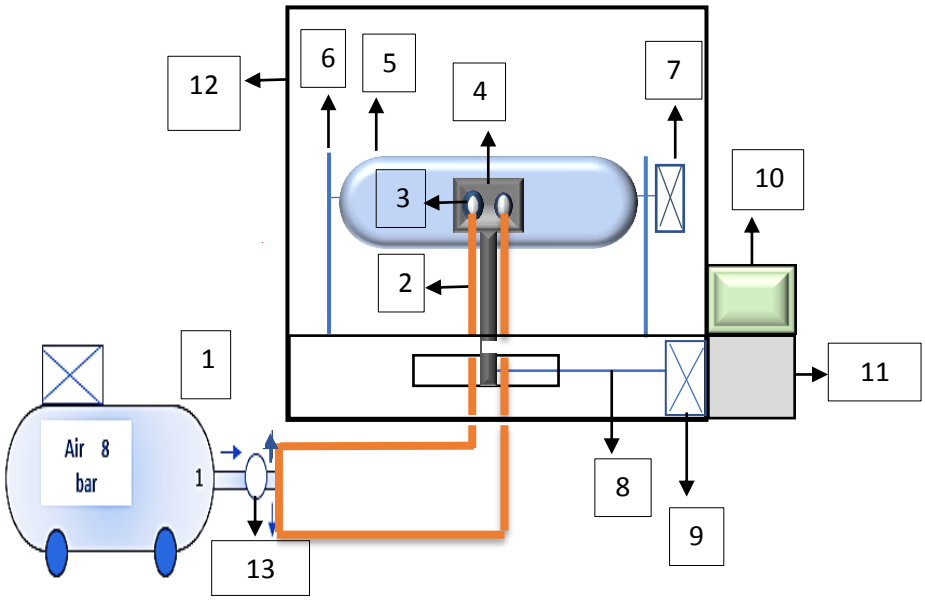
- **المذيبات :**

الأسيتون: تم اختياره بسبب درجة تطايره العالية، كثافته 0.78 g/ml نقاوته 99%.

ثنائي ميتيل الفورم أميد: وزنه المولي 73.09 g/mol، كثافته $0.94\ g/cm^3$.

- **الأجهزة :**

- **جهاز الغزل بالنفخ** :تم استخدام جهاز الغزل بالنفخ (المصنّع محلياً) والموجود في مخبر الألياف النانوية في كلية الهندسة الكيميائية والبترولية – جامعة البعث في إجراء التجارب. يتألف الجهاز من:



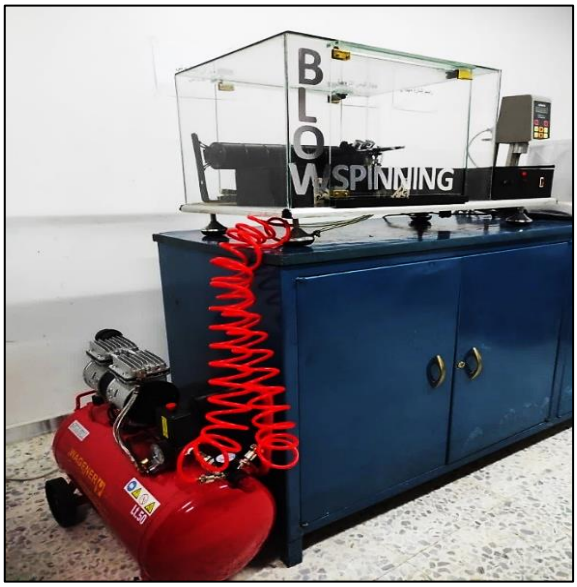
الشكل (9): شكل تخطيطي لجهاز الغزل بالنفخ

1- ضاغط هوائي	8- ذراع الحركة الترددية
2- رأس النفخ	9- محرك الحركة الترددية
3- أنابيب توصيل	10- رافع الجهد
4- حامل	11- لوحة التحكم
5- أسطوانة التجميع	12- حجرة الجهاز
6- حامل أسطوانة التجميع	13- ساعة ضغط
7- محرك الحركة الدورانية	

مبدأ عمل جهاز الغزل بالنفخ:

عند فتح صمام الضاغط الهوائي (1) يخرج تيار الهواء المضغوط عبر الأنابيب (2) إلى رأس النفخ (3) والذي يتم وضعه على وضعية التشغيل ليتم نفخ المحلول البوليميري، من جهة أخرى فإن تشغيل أزرار لوحة التحكم (11) ستؤدي إلى تشغيل الحركة الترددية لحامل رأس النفخ (4)، والحركة الدورانية لأسطوانة التجميع، حيث أن المحرك (7)

يعطي الحركة لأسطوانة التجميع (5) لتبدأ بالدوران، أما المحرك (9) يعطي الحركة عن طريق الذراع (8) إلى الحامل (4) ليبدأ بالحركة الترددية. وعند الحاجة إلى تطبيق جهد كهربائي يتم تشغيل رافع الجهد (10).



الشكل (10): جهاز الغزل بالنفخ الموجود في مخبر الألياف النانوية

- **جهاز قياس لزوجة المحاليل Viscometer:**

يتيح هذا الجهاز قياس لزوجة مجموعة واسعة من المحاليل بسهولة، وذلك ضمن مجالات لزوجة منخفضة ومتوسطة وعالية انطلاقاً من الزيوت والمذيبات، وصولاً إلى المواد الهلامية والإيبوكسية. ويتميز بالعمل عند سرعات مختلفة للمغزل تصل حتى 100 دورة بالدقيقة. ويمكن من خلاله تحديد الخواص الريولوجية للسائل بمعدلات قص مختلفة.

يتكون الجهاز من مغازل دوارة ذات أشكال متعددة، وشاشة LCD تعرض قيم السرعة واللزوجة وواحدتها، وعمود دوار، وقاعدة، وحامل لوعاء المحلول. ويعطي الجهاز إنذاراً في حال حدوث خطأ أثناء القياس. كما يقوم بإجراء اختبار مسح تلقائي في بداية كل

تشغيل عند سرعات مختلفة. ويتم إدخال بارامترات التشغيل المطلوبة من خلال لوحة المفاتيح الأمامية. مجال قيم اللزوجة التي يتحسسها الجهاز يتراوح بين PC (0.1–100).

الشكل (11): جهاز قياس لزوجة السوائل Viscometer

4- خطة البحث:

تمت الدراسة وفقاً للخطوات التالية:

1- تحضير المحاليل البوليميرية
2- قياس لزوجة المحاليل المدروسة
3- إجراء التجارب على جهاز الغزل بالنفخ
4- مناقشة النتائج

1.4. تحضير المحاليل البوليميرية:

تم تحضير مجموعة محاليل من بوليمير بولي لاكتيك أسيد بتراكيز: 5-7-10-12 wt% على الترتيب، باستخدام مذيب مكون من مزيج 40% DMF و60% AC.

بواسطة خلاط مغناطيسي عند درجة حرارة 60 درجة مئوية. ثم تركها تبرد لمدة نصف ساعة.

2.4. قياس لزوجة المحاليل المحضرة:

تم قياس لزوجة المحاليل باستخدام Viscometer. بداية تم تقييم السلوك الريولوجي لأحد المحاليل حيث تم اختيار المحلول ذو التركيز 12wt%، ومن أجل 5 سرعات مختلفة للمغزل (20–100) rpm. حيث استخدم مغزل (سبيندل 3R). النتائج موضحة في الجدول (1).

الجدول (1): نتائج دراسة العلاقة بين اللزوجة ومعدل القص

السرعة rpm	اللزوجة mpa.s (cp)
20	500
30	470
50	470
60	470
100	480

تم ملاحظة أن قيم اللزوجة بدأت ب 500 cp عند السرعة 20 rpm للسبيندل، وانخفضت وصولاً إلى القيمة 470 cp، وبالتالي كانت شبه ثابتة مع حدوث تغيرات طفيفة في قيمها مع تغير معدل القص الأمر الذي يجعل سلوك المحلول قريباً من النيوتوني، وهذا أمر مفيد من أجل نفخ المحلول على جهاز الغزل. أما نتائج قياس لزوجة المحاليل عند تراكيز مختلفة موضحة لاحقاً في الجدول (3).

3.4. إجراء التجارب على جهاز الغزل بالنفخ:

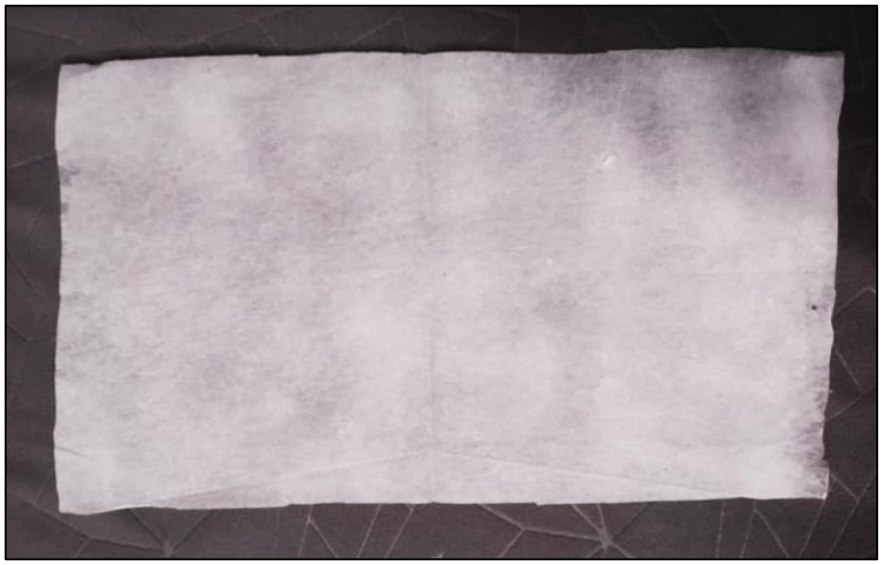
تم اختيار بارامترات تشغيل الجهاز وفقاً للقيم الموضحة في الجدول (2)، وتحضير الجهاز للقيام بتجارب الغزل بالنفخ وفق الخطوات التالية:

- وضع المحلول البوليميري ضمن حجرة البوليمير في رأس النفخ وإغلاقها بإحكام.
- تشغيل الضاغط عند قيم الضغوط المدروسة (كل تجربة عند قيمة ضغط محددة).
- حساب سرعة الهواء تم باستخدام العلاقة (6).

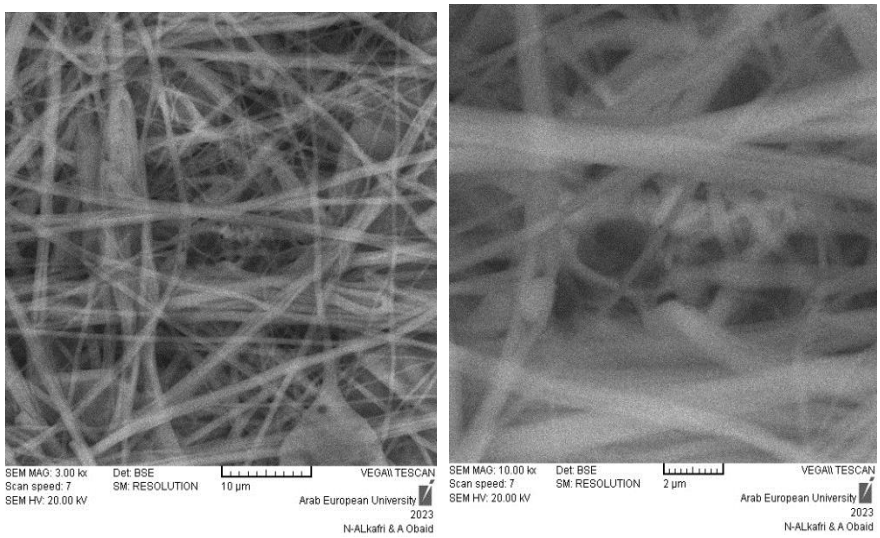
الجدول (2): بارامترات تشغيل جهاز الغزل بالنفخ

حجم المحلول ml	مسافة الرأس عن المجمّع cm	قطر الفوهة Mm	سرعة الهواء m/s	الضغط bar
5	15	1.8	49.6	1
			74.2	2
			98.8	3
			123.5	4

أجريت التجارب الأربعة على جهاز الغزل بالنفخ وفقاً لشروط التشغيل المذكورة سابقاً، لكل محلول من المحاليل المحضّرة، وتم قياس الزمن المستغرق لنفخ حجم المحلول البوليميري بشكل كامل، وحساب تدفق المحلول بقسمة حجم المحلول على زمن التجربة مقدراً بـ ml/min. النتائج موضحة في الجدول (3)، علماً أن نتيجة كل تجربة من تجارب الغزل المجراة كانت عبارة عن تحول المادة البوليميرية بشكل كامل إلى قماش غير منسوج مكون من ألياف نانوية. الشكل (12) يوضح إحدى هذه الشبكات.



الشكل (12): شبكة غير منسوجة من ألياف نانوية ناتجة عن محلول PLA wt7% عند ضغط 2 bar



الشكل (13): صور العينة بواسطة SEM بدقة 2 و10 ميكرومتر عند ضغط **bar 2**

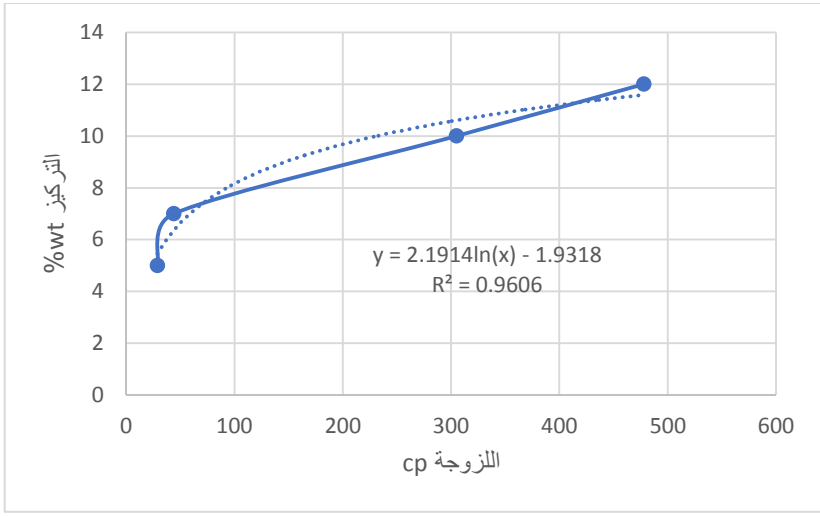
الجدول (3): نتائج التجارب الأربعة

رقم التجربة	التركيز Wt%	متوسط اللزوجة c.p	التدفق (ml/min) الضغط (bar)			
			1	2	3	4
1	5	29	1.1	1.8	2.3	3
2	7	44	0.5	0.85	1	1.4
3	10	305	0.17	0.25	0.42	0.7
4	12	478	لم يخرج	لم يخرج	0.11	0.16

4.4. مناقشة النتائج:

- **العلاقة بين تركيز المحلول ولزوجته :**

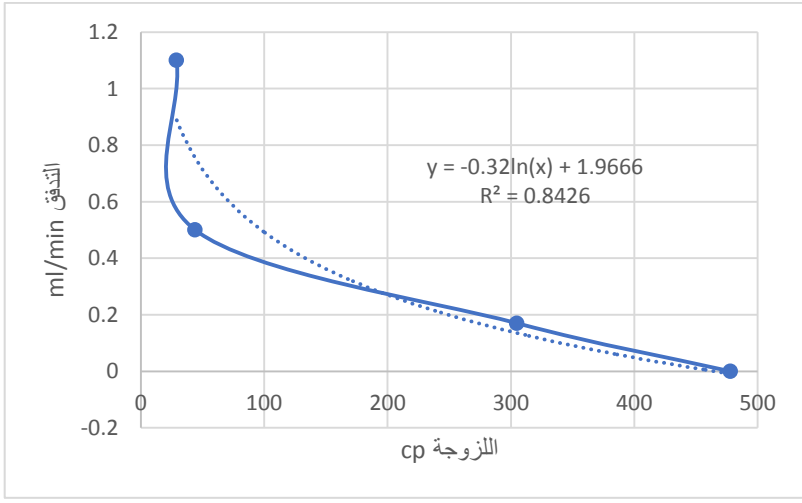
يوضح الشكل (14) أنه بزيادة تركيز المادة البوليميرية ضمن المحلول تزداد لزوجته وهذه أمر متوقع. حيث أن هذه الزيادة تبدأ طفيفة عند تراكيز منخفضة ، وتزداد بشكل ملحوظ وصولاً حتى تركيز12 wt%. هذه العلاقة هي علاقة لوغاريتمية بمعامل بيرسون قدره 0.96. **قد يعود السبب في التغير الحاصل ضمن مجال التركيز من 5 وحتى 7 wt% إلى عدم تساوي المجالات بين قيم التركيز المختارة.**



الشكل (14): العلاقة بين تركيز المحلول ولزوجته

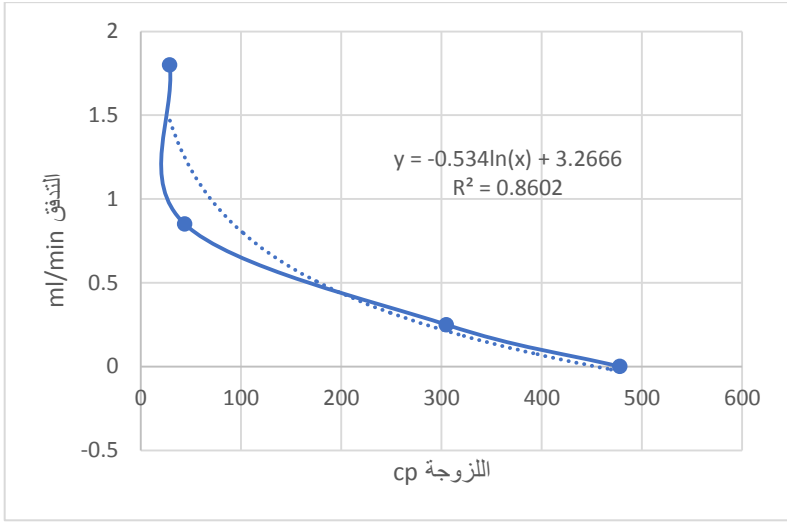
- **العلاقة بين اللزوجة وتدفق المحلول :**

من أجل ضغط bar1:



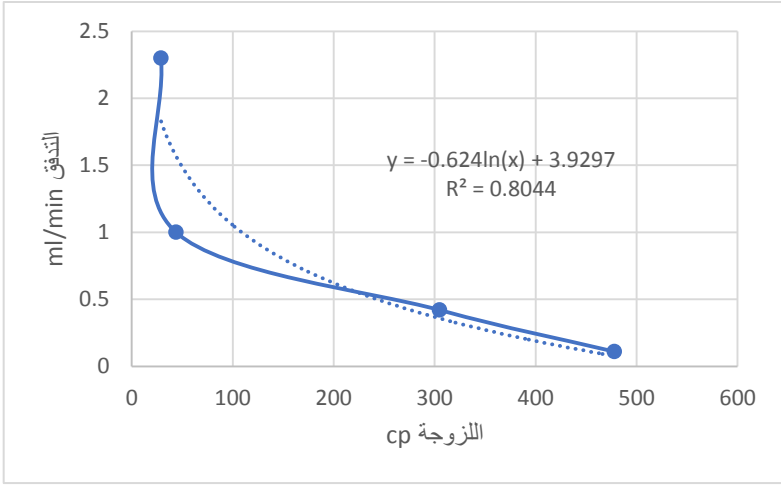
الشكل (15): العلاقة بين لزوجة ومعدل تدفق المحلول عند ضغط bar 1

من أجل ضغط 2 bar:



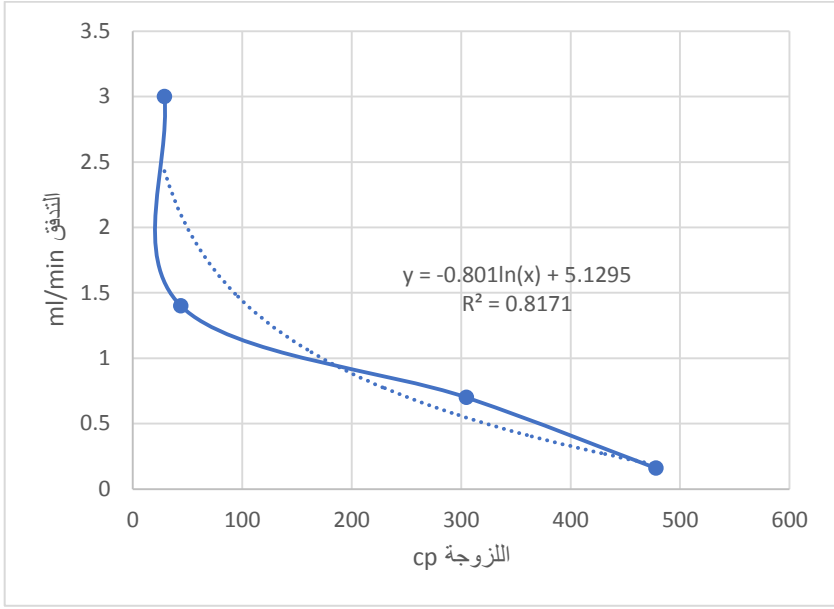
الشكل (16): العلاقة بين لزوجة ومعدل تدفق المحلول عند ضغط 2 bar

من أجل ضغط 3 bar:



الشكل (17): العلاقة بين لزوجة ومعدل تدفق المحلول عند ضغط 3 bar

من أجل ضغط 4 بار:

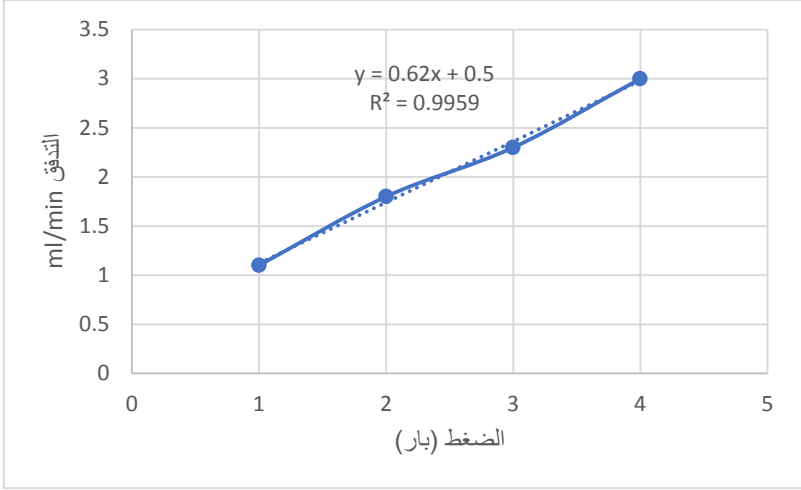


الشكل (18): العلاقة بين لزوجة ومعدل تدفق المحلول عند ضغط 4 bar

المخططات السابقة توضح أنه بزيادة لزوجة المحلول البوليميري (زيادة تركيزه)، ينخفض معدل تدفق المحلول أثناء الخروج من الفوهة الداخلية لجهاز الغزل بالنفخ. وهذه العلاقة بين اللزوجة والتدفق هي علاقة لوغاريتمية. إن السبب في هذا الانخفاض هو أن المحلول يجري تحت تأثير وزنه من خزان رأس النفخ وصولاً إلى الفوهة، وأنه بزيادة قيمة اللزوجة يزداد تأثيرها في ممانعة جريان المحلول ، بالتالي يزداد زمن استهلاك المحلول أثناء التجربة مما يؤدي إلى انخفاض معدل التدفق.

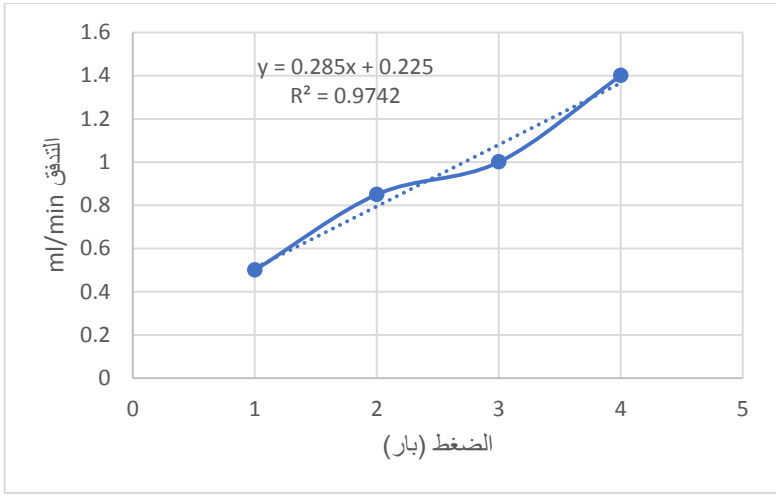
- **العلاقة بين الضغط والتدفق:**

عند تركيز 5 wt%، ولزوجة 29 cp:



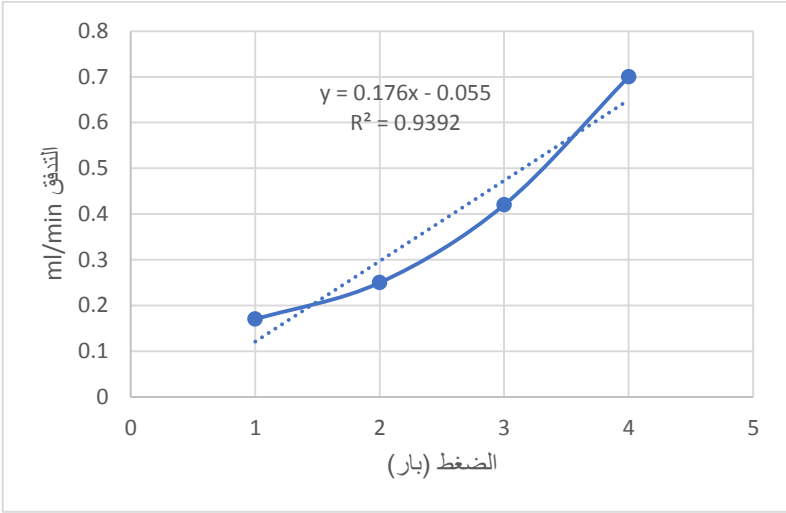
الشكل (19): العلاقة بين الضغط والتدفق عند تركيز 5 wt%

عند تركيز 7 wt%، ولزوجة 44 cp:



الشكل (20): العلاقة بين الضغط والتدفق عند تركيز 7 wt%

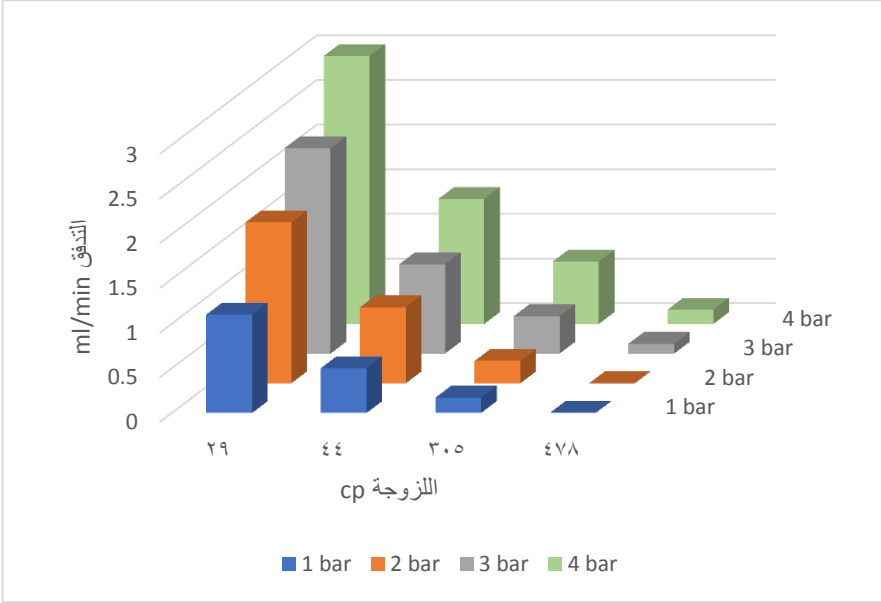
عند تركيز 10 wt% ، ولزوجة 305 cp:



الشكل (21): العلاقة بين الضغط والتدفق عند تركيز 10 wt%

المخططات السابقة توضح أنه بزيادة ضغط الهواء الخارج من الضاغط، يزداد معدل تدفق المحلول البوليميري. تفسر هذه الزيادة بأن زيادة ضغط الهواء يزيد من سرعة خروجه من الفوهة الخارجية، الأمر الذي يسرع من دفع قطرة المحلول البوليميري الخارجة من الفوهة الداخلية وبالتالي زيادة سرعة جريان المحلول، وبالتالي تدفقه خلال زمن التجربة. **يمكن ملاحظة أنه عند تركيز 12 wt%، ولزوجة 478 cp تم استبعاد النقاط عند ضغط 1 و 2 bar من الدراسة بسبب عدم خروج المحلول من الفوهة وبالتالي توقف العملية الإنتاجية، وبناء على ذلك لا يمكن رسم مخطط بياني اعتماداً على نقطتين علماً أن النتيجة متوافقة مع باقي نتائج المخططات.**

الشكل (22) يوضح مقارنة بين جميع البارامترات المدروسة، ويظهر من الشكل أن أعلى إنتاجية على جهاز الغزل بالنفخ (تدفق أعلى للمحلول البوليميري) يمكن الحصول عليها عند ضغط هواء أعلى ، وقيم لزوجة أقل للمحلول .



الشكل (22): مقارنة شاملة بين البارامترات المدروسة

5.4. النتائج النهائية للبحث:

تم في هذا البحث دراسة تأثير لزوجة المحلول البوليميري ، وضغط الهواء الخارج من الضاغط في جهاز الغزل بالنفخ على إنتاجية الجهاز ، وذلك ضمن مجال ضغط (1–4) بار .

تم اختيار هذا المجال بناء على نتائج دراسة سابقة أظهرت أن تشكل الألياف يحدث عند قيم ضغوط ضمن هذا المجال وذلك وفقاً لشروط التشغيل المعتمدة

في البحث والمواصفات الفنية للجهاز. وأنه عند قيم أعلى من 4 بار تتحول عملية التشكيل الليفي إلى ترذيذ.

- بزيادة تركيز المحلول البوليميري، تزداد لزوجته، مما يؤدي إلى انخفاض معدل تدفق المحلول من رأس النفخ وبالتالي انخفاض إنتاجية جهاز الغزل بالنفخ.

- بزيادة ضغط الهواء الخارج من أسطوانة الضاغط، يزداد معدل تدفق المحلول البوليميري وبالتالي تزداد إنتاجية الجهاز.

- من أجل الحصول على إنتاجية عالية لجهاز الغزل بالنفخ يفضل استخدام محاليل بوليميرية ذات تراكيز منخفضة (لزوجة منخفضة)، وتشغيل الجهاز عند ضغوط هواء أعلى، وذلك ضمن شروط التشغيل المتبعة في البحث.

5. المراجع العلمية:

1- Michal Wojasiński, Maciej Pilarek, Tomasz Ciach, (2014) - Comparative studies of electrospinning and solution blow spinning processes for the production of nanofibrous poly(L-lactic acid) materials for biomedi-cal engineering - 00-645 Warszawa, Poland. 2014-0028.

2- Eliton S. Medeiros, Gregory M. Glenn, Artur P. Klamczynski, William J. Orts, Luiz H. C. Mattoso, (2009) - Solution Blow Spinning: A New Method to Produce Micro- and Nanofibers from Polymer Solutions - SP 13560-970, Brazil.

3- Jani H. (2017). Bioactive Coatings and Fibers for Bone Implants and Scaffolds by Atomic Layer Deposition, Electrospinning, Solution Blow Spinning and Electroblowing –, academic dissertation, helsinki.

4- John L. Daristotle, Adam M. Behrens, Anthony D. Sandler, and Peter Kofinas, (2016) - A Review of the Fundamental Principles and Applications of Solution Blow Spinning - American Chemical Society ,2016, 8, 34951-34963.

5- ting chen, xinhou wang, and xiubao huang, (2004) - modeling the air-jet flow field of a dual slot die in the melt blowing nonwoven process - 200051, people's republic of china.

6- Xibo Hao 1, Hui Huang 2 and Yong chun Zeng, (2018) - Original article Simulation of jet velocity in the melt-blowing process using the coupled air–polymer model - 89(16) 3221–3233, china.