

تطوير مواد احتكاك مركبة لتطبيقات بطانات مكابح السيارات باستخدام مواد أولية طبيعية ومخلفات صناعية منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة

طالب الدراسات العليا: م. محسن هيثم الحته

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا - دمشق - سوريا

إشراف الدكتور: د. رفيع جبره

الملخص.

جرى في إطار هذا البحث، دراسة تجريبية لتصنيع مواد احتكاك مركبة من مواد أولية طبيعية ومحلية، مثل صخور البازلت والطف البركاني كمادة حث وسحل، ودقائق تشغيل سبيكة الشبه والمطاط لتطبيقات بطانات مكابح السيارات. كما جرى اختبار مواد الاحتكاك المركبة المحضرة لتحديد خصائصها الميكانيكية ومقارنتها مع مواد مكافئة تجارية تستخدم في تطبيقات بطانات مكابح السيارات. من جهة أخرى، جرى دراسة الترابط بين الخصائص الميكانيكية والخصائص الفيزيائية لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة. أظهرت بعض مواد الاحتكاك المركبة المحضرة مقاومة انعطاف تبلغ (MPa) 53، وقساوة برينل (HB) 55، ومسامية 0.73%، ويمكن ضبط هذه الخصائص بإجراء تغييرات طفيفة على نسب مكونات مواد الاحتكاك المركبة المحضرة. تفوقت مواد الاحتكاك المركبة المحضرة في جميع خصائصها على نظيراتها في الأدبيات، وعلى إحدى مواد الاحتكاك المركبة الموجودة في السوق المحلية المستخدمة في تطبيقات بطانات مكابح السيارات.

كلمات مفتاحية: مواد مركبة - مواد الاحتكاك المركبة - مواد حث وسحل - بطانات مكابح السيارات - البكاليت - ألياف البازلت - ألياف الفولاذ - البازلت - الطف البركاني المسامية - مقاومة الانعطاف.

Development of brake pads friction composite materials using low cost natural and industrial wastes ecofriendly local raw materials

Abstract.

In the framework of this research, experimental study has been realized in order to formulate friction composite materials from local natural and industrial raw materials, such as basalt and volcanic tuff rocks as abrasive materials, brass and rubber machining particles, for automotive brake pads applications. The prepared friction composite materials were tested to determine their mechanical properties and compare them with commercial equivalent materials used in the applications of automotive brake pads. On the other hand, the correlation between the mechanical properties and the physical properties of the prepared friction composite materials, were studied. Some of the prepared friction composite materials showed a flexural strength of 53 (MPa), a Brinell hardness of 55 (HB), a porosity of 0.73%. These properties can be adjusted by making slight modifications of the proportions of the friction composite materials constituents. The prepared friction composite materials were superior in all of their properties to their counterparts in the literature, and to one commercial friction composite materials available in the local market and used in the applications of automotive brake pads.

Key words: composite materials - friction composite materials - abrasives materials - automotive brake pads - Bakelite - basalt fibers - steel fibers - basalt - volcanic tuff – porosity - flexural strength.

1. المقدمة.

تصنف مواد الاحتكاك المركبة على أنها فئة من المواد المركبة التي تُنتج عند تلامسها مع السطوح المقابلة لها قوة احتكاك، فهي مواد تريبولوجية هندسية مصممة لتوليد الاحتكاك، يمكن التنبؤ بمتوسط عمرها الفني عند شروط تشغيل محددة، ويمكن أن تعمل في نظام الاحتكاك الرطب أو نظام الاحتكاك الجاف [1،2].

تُعدّ مواد الاحتكاك المركبة متعددة المكونات، ويتأثر أدائها بشدة باختيار مكوناتها. يتجاوز عدد المواد المستخدمة في صياغة مواد الاحتكاك المركبة 800 مادة، وتصنّف بشكل أساسي ضمن خمس فئات أساسية، هي المادة الرابطة، ومواد التقوية، ومواد الحت والسحل، ومواد التزليق، والمواد المألثة، ويضاف إلى تركيبها أيضاً معدلات الاحتكاك [2،3]. تعتبر بطانات مكابح السيارات وواجهات القوابض من أهم تطبيقات مواد الاحتكاك المركبة [3]. وتعمل مواد الاحتكاك المركبة في أنظمة الكبح على إيقاف المركبات والمعدات والآلات وغيرها بواسطة قوة الاحتكاك [1]. تُصمم المكابح كواحدة من عناصر الآلات التي تقوم بتحويل الطاقة الحركية إلى طاقة حرارية ناتجة عن الاحتكاك بين قرص المكبح وبطاناته [2]. عند صياغة مادة احتكاك مركبة لتطبيقات بطانات مكابح السيارات، يجب أن تحقق مزايا متعددة مثل استقرار وظيفة الاحتكاك خلال الاستعمال، واستقرار معامل الاحتكاك، ومعدل اهتراء مناسب على كامل مجال درجة حرارة التشغيل، والحد الأدنى من انبعاث غبار المكابح، والضجيج المنخفض، وخصائص ميكانيكية عالية لتحمل شروط العمل مثل مقاومة الانعطاف، ومقاومة الشد، ومقاومة الضغط، والقساوة [1]. تُعدّ الخصائص الميكانيكية من أهم العوامل التي تساعد على تحقيق وثوقية عالية في الأداء والأمان. وتشير القوانين في الدول المتقدمة إلى احتمال الآثار البيئية السلبية للعديد من المواد الأولية المستخدمة عادةً في مواد الاحتكاك المركبة التجارية [4]. في هذا البحث، سيجري تطوير مواد احتكاك مركبة تريبولوجية

هندسية لتطبيقات بطانات مكابح السيارات، تعتمد على مساحيق لا عضوية طبيعية من صخور البازلت والطف البركاني المنتشرة في جنوب الجمهورية العربية السورية كمواد حت وسحل، ومخلفات صناعية من دقائق الشبه والمطاط.

تنتمي صخور البازلت إلى عائلة الصخور البركانية (volcanic rocks) التي تعتبر من أشهر عائلات الصخور النارية (Igneous rocks). يُقصد بمصطلح الصخور البركانية أنها عبارة عن صخور نارية ذات بلورات صغيرة نسبياً (أقل من 1 مم). يتم تمييز البازلت عن الصخور البركانية الأخرى عن طريق محتواها من أكسيد السيليكون (SiO_2) الذي تكون نسبته الوزنية (45-52) %، كما تحتوي صخور البازلت أيضاً على أكسيد المغنسيوم وأكسيد الصوديوم وأكسيد البوتاسيوم وأكسيد التيتانيوم وأكسيد الكالسيوم وأكسيد الحديد وأكسيد الألمنيوم [5]. أما الطف البركاني، فهو نوع من الصخور التي تتكون من الرماد البركاني (Volcanic ash) المقذوف من فتحة البركان عند انفجاره. بعد خروج هذا الرماد وترسبه، يمكن أن يتحول إلى صخور صلبة يشكل الرماد البركاني أكثر من 75% من تركيبها تُدعى بالطف البركاني [6-8].

تناول Surojo وزملاؤه [9] دراسة تأثير الصوف الصخري وألياف الزجاج على مقاومة الانعطاف لمادة احتكاك مركبة. أظهرت النتائج دور الصوف الصخري في زيادة مقاومة الانعطاف للمواد المركبة مقارنة بألياف الزجاج. قام Priambada وزملاؤه [10] بتصنيع عينات مواد احتكاك مركبة باستخدام ألياف الكانتالا المعالجة في محلول قلوي لمدة 4 ساعات أو غير المعالجة، وذلك عند نسب حجمية مختلفة 0%، و4%، و8%، و12%. أظهرت النتائج أن المعالجة القلوية لألياف الكانتالا قد حسنت مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ للمواد المركبة، وخاصةً عند النسب الحجمية 4% و8% لهذه الألياف. قام solomon [11] وزملاؤه بتطوير بطانات المكابح وتقييمها باستخدام دقائق قشر الفول السوداني (GS) (Groundnut Shell) كمادة بديلة للأسبستوس. جرى

تطوير مجموعتين من المواد المركبة باستخدام أبعاد دقائق مختلفة من (GS) كمادة مألثة. أظهرت النتائج زيادة كلٍ من مقاومة الضغط والوزن النوعي مع انخفاض أبعاد دقائق (GS). درس Maulana وزملاؤه [12] تأثير ألياف الكانتالا عند نسب حجمية مختلفة 0%، و4%، و8%، و12% على المواد المركبة لبطانات المكابح. حضر Ahmadijokani وزملاؤه [13] مواد احتكاك قائمة على راتنجات الفينول مع نسب حجمية مختلفة من ألياف الكربون، تراوحت ضمن المجال (0-4)%. بيّنت النتائج تحسن القساوة، ومقاومة الانعطاف، وانخفاض الوزن النوعي مع إضافة ألياف الكربون إلى بطانات المكابح. درس Cai وزملاؤه [14] تأثير ألياف الأراميد على السلوك الميكانيكي لمواد الاحتكاك المركبة. أظهرت النتائج انخفاض المسامية ومقاومة الضغط وتزايد مقاومة الانعطاف للمواد المركبة مع زيادة النسبة الحجمية لألياف الأراميد. قام Singh وزملاؤه [15] بتصنيع مواد احتكاك مركبة فينولية هجينة لاستعمالها في بطانة المكابح بالاعتماد على ألياف اللابينوس (الصوف الصخري) وألياف الأراميد. بيّنت النتائج تحسن الخصائص الفيزيائية مثل امتصاص الماء، وقابلية الانضغاط، والمسامية مع زيادة ألياف اللابينوس، بينما تتحسن الخصائص الميكانيكية مثل القساوة، ومقاومة الشد، ومقاومة الانعطاف، مع زيادة ألياف الأراميد. تناول Öztürk وزملاؤه [16] دراسة تأثير ألياف الصوف الصخري، وألياف السيراميك، وألياف الزجاج E، وألياف الفولاذ على الخصائص الميكانيكية لمواد الاحتكاك المركبة. تميزت المواد المركبة المقواة بألياف السيراميك بأعلى قساوة ومقاومة قص، وكانت مقاومة الانعطاف، ومقاومة القص، ومقاومة الضغط في المواد المركبة المقواة بألياف الفولاذ أقل من نظيراتها في المواد المركبة الأخرى. تميزت المادة المركبة المقواة بألياف الزجاج بأعلى مقاومة انعطاف، وبمقاومة قص منخفضة.

2. هدف البحث.

يهدف هذا البحث إلى اصطناع مادة احتكاك مركبة لتطبيقات بطانات مكابح السيارات. جرى في هذا البحث استخدام مساحيق طبيعية لاعضوية من صخور البازلت والطف البركاني، ومواد مألوفة من دقائق الشبه والمطاط ناتجة عن عمليات التشغيل في السوق المحلية، مما يُخفف من التكلفة النهائية للمنتج النهائي، مع اعتبار متطلبات الصحة والسلامة. ربما يكون هذا البحث الأول من نوعه في سوريا على المستوى الأكاديمي والصناعي لتحضير مواد احتكاك مركبة، والعمل على حل بعض الصعوبات التي تواجه تصنيع هذه المواد. بناءً على ما سبق، سيجري اختيار المواد اللازمة لإجراء هذا البحث، واصطناع مادة الاحتكاك المركبة بحيث يتحقق ما يلي:

1. تواجد المواد الأولية في السوق المحلية،
2. مواد أولية محلية طبيعية المنشأ،
3. عدم ظهور نتائج مضرّة على الصحة العامة والبيئة،
4. الاستفادة من مُخلفات عمليات تشغيل المواد المعدنية في السوق المحلية،
5. اختيار مواد لاعضوية تحقق نتائج جيدة كمواد حثّ وسحل،
6. اختيار مواد معدنية تُحسن من الموصلية الحرارية.

3. مواد وطرائق البحث.

1.3 أشكال المواد المستخدمة وأبعادها.

يبين الجدول (1) الوزن النوعي للمساحيق المستخدمة وأبعادها الحبيبية، والوزن النوعي للألياف المستخدمة وطول (L) وقطر كل منها (R).

الجدول (1): شكل المواد المستخدمة وأبعادها ووزنها النوعي.				
الأبعاد	شكل المادة	الوزن النوعي (g/cm ³)	المادة	الوظيفة
(80-30) μm	مسحوق	1.45	راتنج الفينول فورم ألدهيد طراز (PF2A2-131)	المادة الرابطة
	مسحوق	2.9	صخور البازلت	مواد الحت
	مسحوق	2.62	صخور الطف البركاني	والسحل
	مسحوق	4.48	كبريتات الباريوم	المواد المألثة
(0.5-0.25) mm	دقائق	المطاط		
μm ≥250	رقائق (رائش)	8.5	الشبه	
R = (18 - 15) μm	ألياف قصيرة بطول (2-6) mm	2.8	ألياف البازلت	مواد التقوية
R = (75 - 25) μm		7.9	ألياف الفولاذ	
مسحوق نانومتري		1.95	هباب الفحم	مادة التزليق

2.3 طرائق الاصطناع.

أولاً: عمليات الطحن.

استخدمت مطحنة كرات انتاج شركة (Retsch) ذات الطراز (pm400) عند سرعة دوران (350 r.p.m) وزمن 30 دقيقة لطحن المادة الرابطة ومواد الحت والسحل وكبريتات الباريوم، للحصول عليها جميعاً وفقاً للأبعاد المذكورة في الجدول (1).

ثانياً: تقطيع الألياف وبعثرتها.

استخدام خلاط كهربائي نوع (DSP) ذو الطراز (KA3025) عند سرعة دوران 25000 (r. p. m) لمدة 0.5 – 0.25 (min)، وذلك من أجل تقطيع ألياف البازلت للحصول على ألياف قصيرة مناسبة وفقاً للأطوال المذكورة في الجدول (1)، وبعثرتها لتسهيل التعامل معها لاحقاً في عمليات الخلط.

ثالثاً: الخلط الميكانيكي الجاف.

يجري خلط المواد على شكل مساحيق فقط لتحقيق أكبر قدر ممكن من التجانس فيما بينها خلال زمن محدد، ثم خلطها مع الألياف كمرحلة أخيرة خلال زمن محدد أيضاً ليصبح بذلك المزيج كاملاً وجاهزاً لعمليات القولبة. يوضح الجدول (2) زمن استخدام الخلاط الكهربائي لخلط المساحيق وخلط المزيج كاملاً.

الجدول (2): الزمن اللازم بالدقيقة لمزج المكونات باستعمال الخلاط الكهربائي.	
2	زمن خلط المواد على شكل مساحيق
1	زمن خلط كامل مزيج مادة الاحتكاك (مساحيق وألياف)

رابعاً: عملية القولبة.

استخدم لاصطناع مواد الاحتكاك المركبة، مكبس هيدروليكي انتاج شركة (CEAST) ذو الطراز (6707)، جرى العمل على زيادة الضغط باستخدام ذراع يدوي يتم من خلاله التحكم بضغط الزيت الهيدروليكي. يؤمن المكبس إمكانية رفع درجة الحرارة ضمن القالب المعدني أثناء الكبس من خلال وشيكتين كهربائيتين موجودتين في صفيحتي المكبس، وتبلغ درجة الحرارة العظمى التي يمكن الوصول إليها (°C) 316 . تملئ حجرات القالب بالمزيج، ثم يوضع ضمن المكبس، وتُرفع درجة حرارة الوشيكتين إلى (°C) 200، وذلك لضمان وصول الحرارة ضمن القالب إلى (°C) 160، وهي درجة حرارة انصهار

البكالييت. وعن طريق الذراع الهيدروليكي، يتم رفع الضغط تدريجياً ومراقبته عن طريق ساعة الضغط الموجودة في المكبس حتى ثباته عند قيمة محددة، يأخذ ثبات الضغط حوالي (2-3) دقيقة، ويكون ثبات الضغط مؤشراً على بدء تصالب البوليمير، أي تصالب السلاسل البوليميرية وتشكل بنية ثلاثية الأبعاد. بعد ثبات الضغط لفترة خمس دقائق، يتم تحريره، وإخراج القالب، وتبريده لمدة خمس دقائق، وإخراج العينة. وبذلك يكون زمن دورة القولبة حوالي (12-13) دقيقة.

خامساً: المعالجة الحرارية.

بعد اخراج العينات من القالب وتبريدها، توضع ضمن فرن للمعالجة الحرارية من إنتاج شركة (memmert) ذي طراز (700)، عند درجة حرارة محددة (الجدول رقم 3)، وذلك من أجل التأكد من إتمام عملية البلمرة وتصالب السلاسل البوليميرية بشكل كامل وتشكل البنية ثلاثية الأبعاد لبوليمير البكالييت.

سادساً: الإنهاء.

تجري عمليات الإنهاء، عند الضرورة، بعد إخراج العينة من المعالجة الحرارية وتبريدها، حيث يتم صقل السطوح والحواف عن طريق ورق الصنفرة من إنتاج شركة (BUEHLER) بقياسات (240-600-1200)، لتصبح جاهزة للاختبارات اللاحقة. يمكن توضيح مراحل الاصطناع والعمل المخبري وفق المخطط في الشكل (1).

تطوير مواد احتكاك مركبة لتطبيقات بطانات مكابح السيارات باستخدام مواد أولية طبيعية ومخلفات صناعية منخفضة التكلفة وصديقة للبيئة



الشكل (1): مخطط مراحل الاصطناع والعمل المخبري.

يعطي الجدول (3) شروط اصطناع بوليمير البكاليت (PF2A2-131) في مجموعة عيناته (BAK)، وتركيب مجموعات مواد الاحتكاك المركبة المحضرة وشروط اصطناعها.

الجدول (3): شروط اصطناع بوليمير البكاليت، وتركيب مجموعات مواد الاحتكاك المركبة وشروط اصطناعها.						بوليمير البكاليت	التركيب (Wt%)
مواد الاحتكاك المركبة							
F17BS	F20BSC5	F20BSC10	F20BS20	F20B15S	F20BS	BAK	بكاليت
17%	20%	20%	20%	20%	20%	100%	ألياف البازلت
10%	10%	10%	10%	10%	15%	-	ألياف الفولاذ
20%	20%	20%	20%	15%	15%		البازلت
9%	10%	7.5%	10%	10%	10%		الطف البركاني
9%	10%	7.5%	10%	10%	10%		هباب الفحم
5%	5%	10%	10%	10%	10%		المطاط
2%	2%	2%	2%	2%	2%		كبريتات الباريوم
20%	15%	15%	10%	15%	10%		الشبه
8%	8%	8%	8%	8%	8%		
160							160
92.67						18.53	الضغط (MPa)
مع تحرير الضغط ثلاث مرات خلال عملية القولبة للتخلص من الغازات الناتجة عن عمليات التبخر							درجة حرارة المعالجة الحرارية □ وزمنها (Hr)
(3) 160						(3) 160	

3.3 طرائق الاختبار.

1.3.3 توصيف البكالييت باستعمال مطيافية الأشعة تحت الحمراء.

أجري توصيف بوليمير البكالييت (PF2A2-131) باستعمال مطيافية الأشعة تحت الحمراء (Fourier Transform Infrared Radiation FTIR) باستعمال جهاز تحليل من انتاج شركة (Bruker) ذي الطراز (Vector 22)، وتم مقارنة طيفه مع طيف بوليمير بكالييت آخر من انتاج شركة (BUEHLER).

2.3.3 اختبارات الوزن النوعي والمسامية.

أولاً: قياس الوزن النوعي التجريبي (ρ_{ex}).

جرت اختبارات الوزن النوعي بالاعتماد على مبدأ ارخميدس عن طريق السائل المزاح بواسطة الميزان (SARTORIUS LA1200S) ومجموعة قياس الوزن النوعي الملحقة به، وذلك بوزن العينة في الهواء، ووزنها معلقة في الماء المقطر عند درجة حرارة الغرفة، وتطبيق العلاقة (1) [11].

$$\rho_{ex} = \frac{m_1 \cdot \rho_{H_2O}}{m_1 - m_2} \dots (1)$$

حيث، ρ_{ex} الوزن النوعي التجريبي للعينة $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ ، m_1 وزن العينة في الهواء (g)، m_2 وزن العينة معلقة في الماء المقطر (g)، ρ_{H_2O} الوزن النوعي للماء المقطر عند درجة حرارة الغرفة $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$. جرى اختبار الوزن النوعي على 5 عينات في كل مجموعة، وحسبت القيمة الوسطية والانحراف المعياري.

ثانياً: حساب الوزن النوعي النظري (ρ_{th}).

بمعرفة الوزن النوعي (ρ_i)، والنسبة الوزنية (W_{t_i}) لكل مادة من المواد المستخدمة الداخلة في تركيب مواد الاحتكاك المركبة المُحضرة كما في الجدول (1)، تم حساب الوزن النوعي النظري وفقاً للعلاقة (2) [17].

$$\rho_{th} = \frac{1}{\frac{W_{t_1}}{\rho_1} + \frac{W_{t_2}}{\rho_2} + \dots + \frac{W_{t_i}}{\rho_i}} \dots (2)$$

ρ_{th} الوزن النوعي النظري للعينة $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$.

ثالثاً: حساب المسامية ($V_p\%$).

بحساب الوزن النوعي النظري وقياس الوزن النوعي التجريبي للعينات بعد المعالجة الحرارية، يتم حساب مسامية مواد الاحتكاك المركبة وفقاً للعلاقة (3) [17].

$$V_p\% = \frac{\rho_{th} - \rho_{ex}}{\rho_{th}} \times 100 \dots (3)$$

حيث، V_p النسبة الحجمية للمسامات (المسامية) في مواد الاحتكاك المركبة المُحضرة. جرى تحديد المسامية على 5 عينات في كل مجموعة، وحسبت قيمتها الوسطية وانحرافها المعياري.

3.3.3 الاختبارات الميكانيكية.

جرت اختبارات الانعطاف والضغط على جهاز الاختبارات الميكانيكية العامة من إنتاج شركة (JINAN) طراز (WDW-50).

1.3.3.3 اختبار الانعطاف ثلاثي النقاط.

جرت اختبارات الانعطاف ثلاثي النقاط بمرجعية المواصفة (ASTM D790) عند سرعة (5 mm/min) على عينات موشورية أبعادها $60 \times 8 \times 3 \text{ mm}^3$. في نهاية الاختبار، يجري رسم المنحني حمل - تشوه، وحساب القيم الوسطية والانحراف المعياري لمعاملات اختبار الانعطاف لخمس عينات في كل مجموعة.

أولاً: مقاومة الانعطاف (σ_{fs}).

وهي المقاومة التي تنهار عندها العينة، وتُحسب من العلاقة (4) [18].

$$\sigma_{fs} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \dots (4)$$

حيث، σ_{fs} مقاومة الانعطاف (MPa)، F_{max} الحمل الأعظمي (N)، L طول العينة بين المسندين (mm)، d سماكة العينة (mm)، b عرض العينة (mm).

ثانياً: معامل يونغ (E).

جرى حساب معامل يونغ من العلاقة (5) [19].

$$E = \left[\frac{F_2 - F_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \right] \cdot \frac{L^3}{4 \cdot b \cdot d^3} \dots (5)$$

حيث، E معامل يونغ (GPa)، Δ_1 (mm) تشوه العينة الموافق للحمل F_1 (N)، Δ_2 (mm) تشوه العينة الموافق للحمل F_2 (N)، يمثل الحد $\left[\frac{F_2 - F_1}{\Delta_2 - \Delta_1} \right]$ ميل الجزء الخطي الخاص بكل عينة ضمن المجال (10% - 30%) من المنحني حمل - تشوه.

2.3.3.3 اختبار القساوة.

جرى اختبار قساوة برينل (Brinell HB) في درجة الحرارة العادية لكل مادة احتكاك مركبة على 5 عينات باستعمال الجهاز (HBRV-187.5 hardness tester) وتطبيق حمل (kg) 62.5 على كرة فولاذية قطرها (mm) 2.5 خلال 30 ثانية، وقياس قطر الأثر على سطح العينة لحساب رقم قساوتها برينل من العلاقة (6) [18]، وحساب القيمة الوسطية والانحراف المعياري لكل مادة.

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{0.5}]} \dots (6)$$

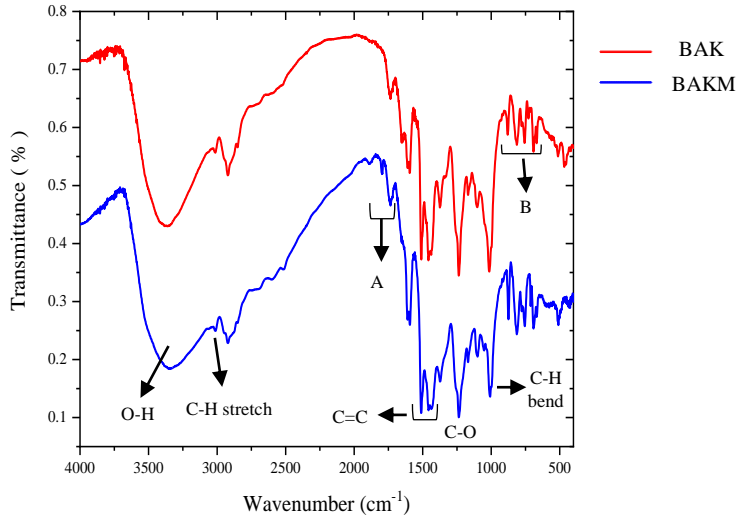
حيث، P الحمل المطبق (kg)، D قطر الكرة (mm)، d قطر الأثر (mm).

جرى مقارنة جميع نتائج الاختبارات الميكانيكية لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة مع مقابلاتها لعينات تجارية لبطانات مكابح السيارات المشار إليها بالرمز (COM).

4. النتائج ومناقشتها.

1.4 توصيف بوليمير البكالييت بمطيافية الأشعة تحت الحمراء.

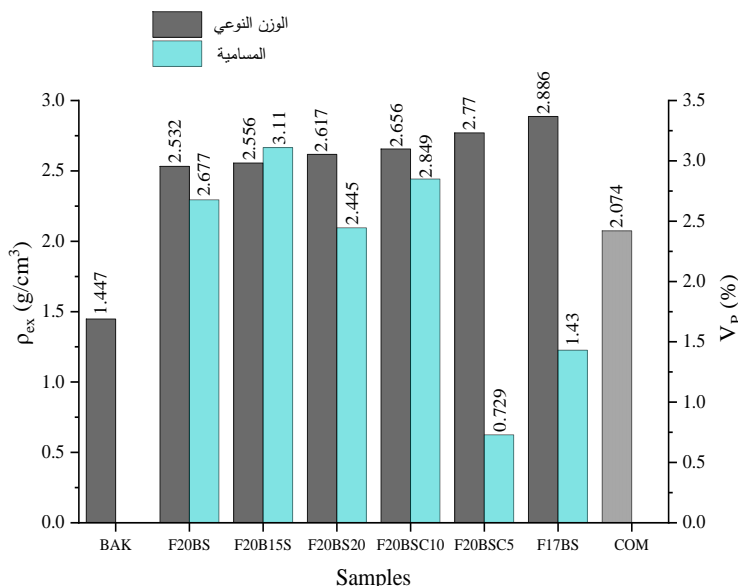
يعطي الشكل (2) طيف الأشعة تحت الحمراء لبوليمير البكالييت (PF2A2-131) المشار إليه بالرمز (BAK)، وطيف بوليمير بكالييت آخر من إنتاج شركة (BUEHLER) الأمريكية المشار إليه بالرمز (BAKM). يلاحظ في الشكل (2) تطابق كبير في قمم الامتصاص بين طيفي بوليميري البكالييت مع وجود إزاحة في طيف بكالييت (BUEHLER). يلاحظ وجود قمة امتصاص عند طول موجة ضمن المجال $(3620-3000) \text{ cm}^{-1}$ ناتجة عن اهتزاز الرابطة (O-H) في الراتنجات الفينولية. يُلاحظ أيضاً قمتي امتصاص عند طول موجة ضمن المجال $(1475-1600) \text{ cm}^{-1}$ ناتجة عن الاهتزاز الامتطاطي للرابطة (C=C) في الحلقة العطرية. أما مجموعة القمم (A) الواقعة ضمن المجال $(2000-1667) \text{ cm}^{-1}$ ، ومجموعة القمم (B) الواقعة ضمن المجال $(800-750) \text{ cm}^{-1}$ ، فهي ترتبط بنوع الاستبدال في الحلقة العطرية. تظهر قمة امتصاص بالقرب من طول موجة $(1200) \text{ cm}^{-1}$ بسبب اهتزاز الرابطة بين حلقة الفينول والأكسجين، أي الرابطة (C-O)، أما قمتا الامتصاص الواقعتان ضمن المجال $(3050-3010) \text{ cm}^{-1}$ و $(960-900) \text{ cm}^{-1}$ ، فهما ترتبطان باهتزاز الرابطة (C-H).



الشكل (2): مقارنة طيوف تحليل (FTIR) لكل من البكالييت BAK و BAKM.

2.4 الوزن النوعي والمسامية.

يعطي الشكل (3) قيم كل من الوزن النوعي التجريبي لعينات مجموعة البكالييت (BAK) (PF2A2-131)، ولعينات مواد الاحتكاك المركبة المحضرة منه، ومساميتها بعد المعالجة الحرارية، والوزن النوعي التجريبي لمادة الاحتكاك المركبة التجارية (COM) المستخدمة لتطبيقات بطانات مكابح السيارات.



الشكل (3): الوزن النوعي التجريبي والمسامية ليوليمير البكالييت، ولعينات مواد الاحتكاك المركبة المحضرة منه والتجارية.

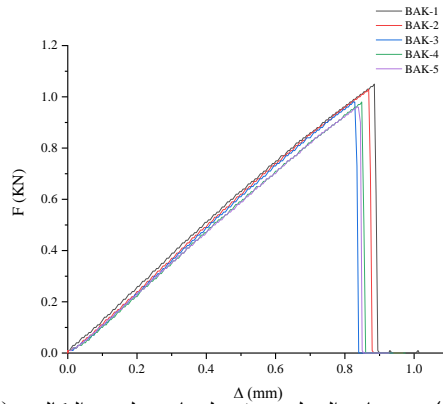
حققت مادة الاحتكاك المركبة (F20BSC5) أقل مسامية بلغت 0.729%، ويعود ذلك إلى احتوائها على أقل نسبة وزنية من هباب الفحم (5%) ذي الوزن النوعي المنخفض مقارنة بباقي المواد المستخدمة، وبالتالي، ساعد انخفاض نسبته الحجمية ضمن مادة الاحتكاك المركبة على إشباع وتغليف البكالييت لباقي مكونات مادة الاحتكاك المركبة (F20BSC5) بشكل أفضل، وهذا ما يؤكد ارتفاع مسامية مادة الاحتكاك (F20BSC10) نتيجة ارتفاع النسبة الوزنية لهباب الفحم فيها. من جانب آخر، يمكن الإشارة إلى أن مواد الاحتكاك المركبة التي تم تحضيرها تميزت بمسامية جيدة جداً أقل من (5%)، يعود ذلك إلى سببين، السبب الأول هو قدرة بوليمير البكالييت (-PF2A2 131) على تغليف وإشباع مكونات مواد الاحتكاك المركبة المحضرة بشكل جيد. ويرتبط ذلك باحتمال انسيابية عالية تميز بها بوليمير البكالييت، أما السبب الثاني، فهو مساهمة استخدام كبريتات الباريوم كمادة مألثة، وألياف الفولاذ إلى جانب ألياف البازلت كمواد تقوية، حيث ساهم الوزن النوعي العالي لألياف الفولاذ وكبريتات الباريوم بانخفاض

نسبتهما الحجمية في مواد الاحتكاك المركبة المحضرة، وهذا ما ساعد على تغليف واشباع باقي مكونات مواد الاحتكاك المركبة بشكل كبير بمصهور البكالييت قبل تصالبه (انتهاء عملية البلمرة)، والحصول على مسامية منخفضة. وسينعكس كل ذلك على خصائص ميكانيكية أفضل سيتم مناقشتها لاحقاً.

3.4 الخصائص الميكانيكية.

1.3.4 اختبار الانعطاف ثلاثي النقاط.

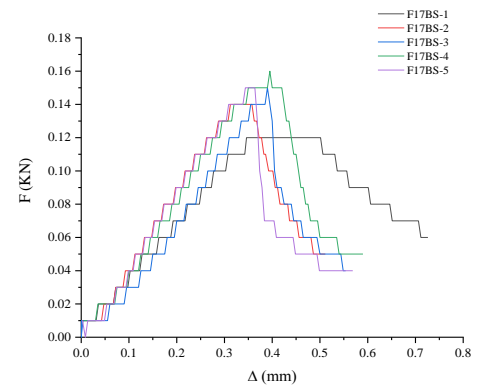
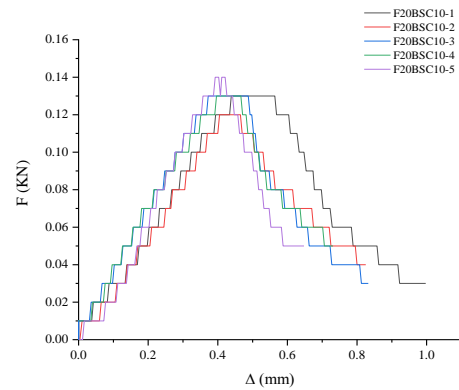
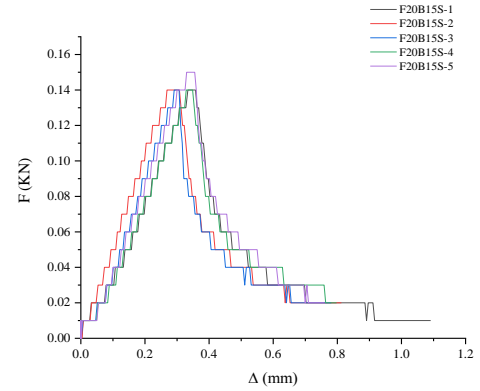
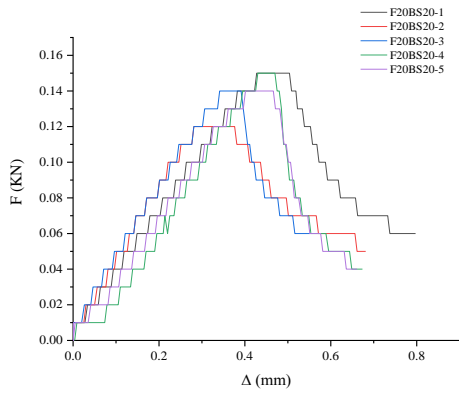
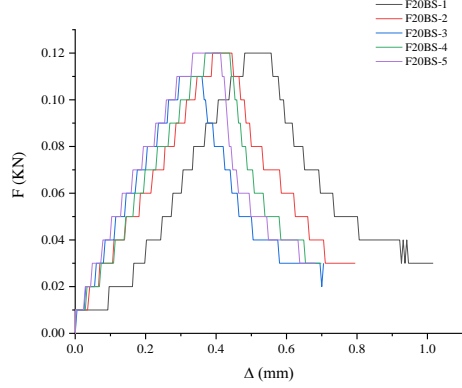
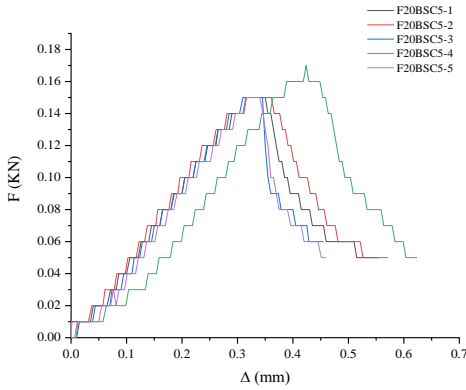
يبين الشكل (4) منحنيات الحمل - تشوه لعينات مجموعة (BAK) البكالييت (-PF2A2 131). يلاحظ ازدياد القوة أثناء الاختبار وصولاً إلى الحمل الأعظمي (F_{max})، الذي تنهار عنده العينة فجأة. إن سلوك البكالييت هذا هو بوضوح سلوك قصف أظهرته جميع عيناته.



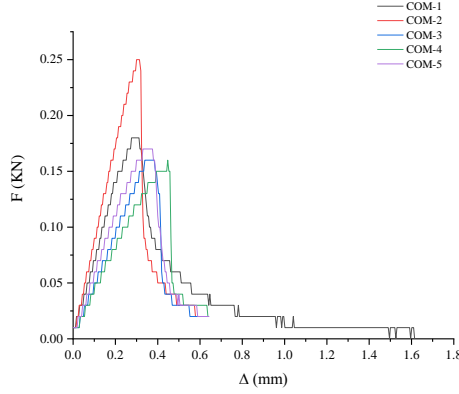
الشكل (4): منحنيات الحمل - تشوه لعينات بوليمير البكالييت (BAK).

يبين الشكلان (5) (6) منحنيات الحمل - تشوه لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة والتجارية. يمكن ملاحظة أن سلوك البكالييت القصف قد بدأ بالتراجع، حيث تزداد القوة أثناء الاختبار وصولاً إلى الحمل الأعظمي (F_{max})، يلي ذلك مرحلة استقرار يمكن ملاحظتها في المنحنيات قبل حدوث انهيار العينة بشكل نهائي. يعود ذلك إلى سببين، السبب الأول، احتواء المواد المحضرة على نسبتيين وزنيتين محدودتين من البكالييت (17-20)%، والسبب الثاني، وجود الألياف القصيرة التي تساعد على تأخير الانهيار

الكامل لمادة الاحتكاك المركبة، وتعمل على زيادة مقاومتها، حيث تنهار المادة الرابطة
ومن ثم تنهار الألياف.

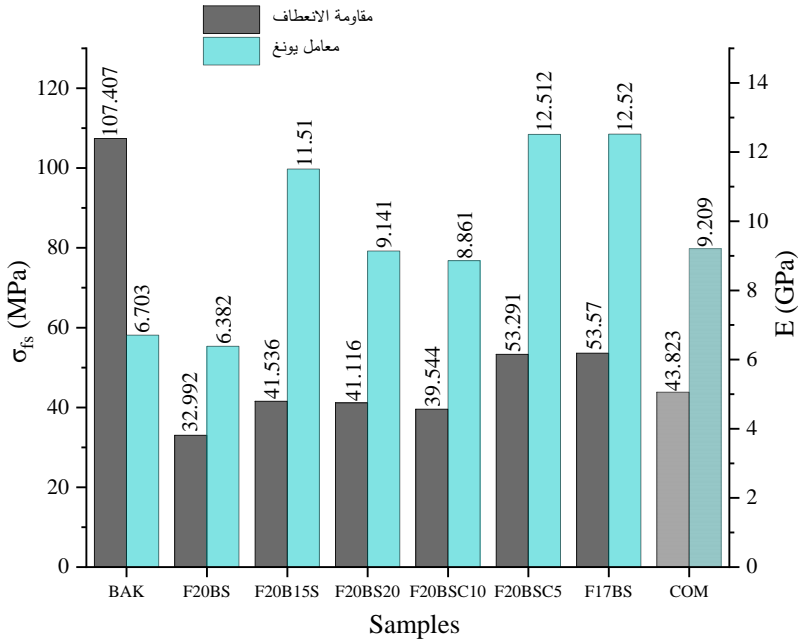


الشكل (5): منحنيات الحمل - تشوه لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة.



الشكل (6): منحنيات الحمل - تشوه لعينات مواد الاحتكاك المركبة التجارية.

يبين الشكل (7) مقاومة انعطاف مواد الاحتكاك المركبة المحضرة، ومقارنتها فيما بينها ومع مادة الاحتكاك المركبة التجارية (COM).



الشكل (7): مقاومة الانعطاف ومعامل يونغ لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة والتجارية (COM).

حققت مادة الاحتكاك المركبة (F20BS) أقل مقاومة انعطاف (MPa) 32.992. جرى بعد ذلك عدة محاولات لتحسين مقاومة الانعطاف من خلال تغيير نسب بعض مكوناتها، ولا سيما نسبي مادتي كبريتات الباريوم وألياف الفولاذ على النحو التالي:

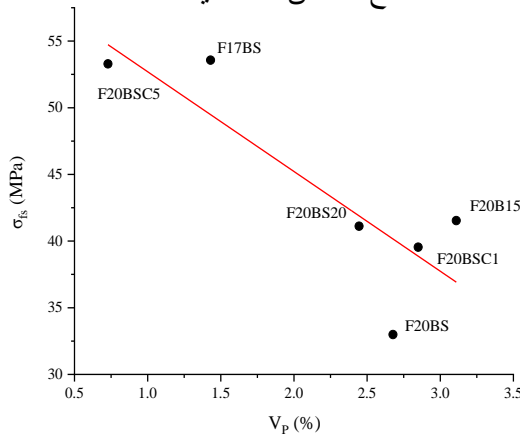
1. أدت زيادة النسبة الوزنية لكبريتات الباريوم في مادة الاحتكاك (F20B15S) على حساب النسبة الوزنية لألياف البازلت في مادة الاحتكاك (F20BS)، إلى زيادة مقاومة الانعطاف إلى (MPa) 41.536، أي بنسبة زيادة قدرها 25%،
2. أدت زيادة النسبة الوزنية لألياف الفولاذ في مادة الاحتكاك (F20BS20) على حساب النسبة الوزنية لألياف البازلت في مادة الاحتكاك (F20BS) إلى زيادة مقاومة الانعطاف إلى (MPa) 41.116،
3. أدت زيادة النسبة الوزنية لكل من كبريتات الباريوم وألياف الفولاذ معاً في مادة الاحتكاك (F20BSC10) على حساب النسبة الوزنية للبازلت وأليافه والطف البركاني في مادة الاحتكاك (F20BS)، إلى انخفاض طفيف في مقاومة الانعطاف (MPa) 39.544 عما كانت عليه في مادتي الاحتكاك (F20B15S- F20BS20)، يشير هذا إلى أن البازلت والطف البركاني قد ساهما، بشكل أو بآخر في تحسين مقاومة الانعطاف لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة،
4. أدت زيادة النسبة الوزنية لكل من كبريتات الباريوم وألياف الفولاذ معاً في مادة الاحتكاك (F20BSC5) على حساب النسبة الوزنية لألياف البازلت وهباب الفحم في مادة الاحتكاك (F20BS)، إلى زيادة مقاومة الانعطاف إلى (MPa) 53.291، أي بنسبة زيادة قدرها 61%، ويعود ذلك إلى تخفيض النسبة الوزنية لهباب الفحم إلى 5%، مما يخفض نسبته الحجمية في مادة الاحتكاك المركبة، ويخفض سطح حبيباته النانومترية الكبير، وبالتالي كمية البكالييت اللازمة لتغليفها، ويزيد كمية البكالييت التي ستغلف المكونات الأخرى في مادة الاحتكاك المركبة،

5. أدت زيادة النسبة الوزنية لكل من كبريتات الباريوم وألياف الفولاذ معاً في مادة الاحتكاك (F17BS) على حساب النسبة الوزنية للبازلت وأليافه والطف البركاني وهباب الفحم في مادة الاحتكاك (F20BS)، إلى زيادة مقاومة الانعطاف إلى (MPa) 53.57، أي بنسبة زيادة قدرها 62%، يمكن تفسير كل ذلك على النحو التالي:

- أ- مقاومة الانعطاف العالية لبوليمير البكالييت المستخدم، وبالتالي تحسن مقاومة الانعطاف في مواد الاحتكاك المركبة المحضرة منه،
- ب- الانسيابية الجيدة لبوليمير البكالييت المستخدم وبالتالي قدرته على اشباع كامل مكونات مواد الاحتكاك المحضرة،
- ت- حسن استخدام كبريتات الباريوم كمادة مالئة، وألياف الفولاذ ذات المرونة العالية كمادة تقوية من مقاومة الانعطاف، وذلك بسبب وزنهما النوعي العالي، وبالتالي، انخفاض نسبتهما الحجمية في مواد الاحتكاك المركبة المحضرة، وهذا ما ساعد على تغليف واشباع باقي مكونات مواد الاحتكاك المركبة بشكل كبير بمصهور البكالييت، والحصول على مسامية منخفضة، بالإضافة إلى خصائص الالتصاق الجيدة بين بوليمير البكالييت وهذه المواد. ساعد كل ذلك على ارتفاع مقاومة الانعطاف في مواد الاحتكاك المركبة المحضرة.
- ث- ساعد انخفاض النسبة الوزنية لألياف البازلت على زيادة مقاومة الانعطاف، بسبب تخفيض مساهمة سلوكها القصف، وبسبب تقليل تجمعها على شكل حزم تعيق انسياب مصهور البكالييت أثناء عملية البلمرة، وتحدّ من قدرته على اشباع باقي مكونات مواد الاحتكاك المحضرة عند ارتفاع النسبة الوزنية لألياف البازلت.

تعد قيم مقاومة الانعطاف (MPa) (32.99-41.53-41.11-39.544) لمواد الاحتكاك (F20BS - F20B15S - F20BS20 - F20BSC10) على الترتيب منافسة لمقاومة انعطاف مادة الاحتكاك المركبة التجارية (COM). أما قيم مقاومة

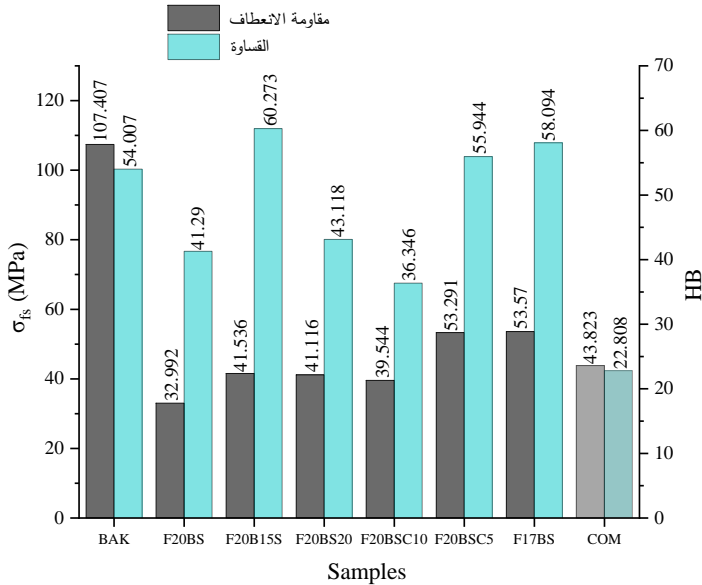
الانعطاف (MPa) (53.57-53.291) لمادتي الاحتكاك (F17BS- F20BSC5) على الترتيب، فقد كانت أعلى من مقاومة الانعطاف لمادة الاحتكاك المركبة التجارية (COM). مع تحسن مقاومة الانعطاف في مواد الاحتكاك المركبة المحضرة، لوحظ أيضاً تحسن معامل يونغ بسبب مساهمة الألياف ومادتي الحت والسحل في تحسين مقاومة التشوه لمواد الاحتكاك المركبة، ففي مواد الاحتكاك (F17BS- F20BSC5) (F20B15S)، وهي المواد الأفضل من حيث مقاومة الانعطاف، كانت قيم معامل يونغ أعلى من قيمته في مادة الاحتكاك التجارية (COM). يسمح مجال تغير مقاومة انعطاف مواد الاحتكاك المركبة المحضرة العريض نوعاً ما، بالتحكم بمقاومة الانعطاف لهذه المواد ضمن هذا المجال عن طريق تعديل طفيف في نسب مكوناتها. بدراسة خصائص الانعطاف والمسامية لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة، يلاحظ في الشكل (8) اقتران تحسن مقاومة الانعطاف مع انخفاض المسامية، حيث تزداد مقاومة الانعطاف مع تناقص المسامية، وهذا ما يعطي مؤشراً ممتازاً عن دقة نتائج حساب الوزن النوعي والمسامية ومعاملات الانعطاف لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة، ويتفق مع الاتجاه العام للترابط بين الخصائص الميكانيكية للمواد ومساميتها. يشير خط الاتجاه في الشكل (8) على ازدياد مقاومة الانعطاف مع تناقص المسامية.



الشكل (8): تغير مقاومة الانعطاف مع تغير المسامية والتركيبي الكيميائي لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة.

2.3.4 اختبار قساوة برينل.

يبين الشكل (9) الترابط بين قساوة برينل ومقاومة الانعطاف لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة والتجارية.



الشكل (9): الترابط بين قساوة برينل ومقاومة الانعطاف لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة والتجارية.

يُلاحظ من الشكل (9) انخفاض قساوة مادة الاحتكاك المركبة (F20BS) مقارنة بباقي مواد الاحتكاك المحضرة مع ازدياد النسبة الوزنية لألياف البازلت. فعلى الرغم من قساوة البازلت، وبالتالي، قساوة أليافه، إلا أنها تتجمع على شكل حزم، وتعيق قدرة البكالييت على إشباعها، مما قد يؤدي إلى سهولة اختراق سطح مواد الاحتكاك المركبة التي تزداد فيها النسبة الوزنية لألياف البازلت. على عكس ذلك، حققت ألياف الفولاذ نتائج قساوة أفضل مع زيادة نسبتها الوزنية بسبب خصائص التصاقها الجيدة مع البكالييت. حققت مادة الاحتكاك (F20B15S) القساوة الأعلى [60.273 HB] لاحتوائها على أعلى نسبة وزنية من مواد الحت والسحل القاسية (البازلت والطف البركاني 20%)، وعلى أقل نسبة وزنية من ألياف البازلت 10%، وعلى ثاني أعلى نسبة وزنية من كبريتات الباريوم 15%. ساهم كل ذلك بأن تكون هذه المادة

(F20B15S) الأفضل من حيث قساوة برينل. حققت مادة الاحتكاك (F17BS)، بسبب احتوائها على أعلى نسبة وزنية من كبريتات الباريوم 20%، قساوة [HB] 58.094 قريبة منها في المادة (F20B15S). ازدادت قساوة برينل مع ازدياد النسبة الوزنية لكبريتات الباريوم، ويعود ذلك لسببين، أولاً قساوتها العالية نسبياً، وثانياً، قدرة مصهور البكاليت على اشباعها بشكل جيد. حققت مواد الاحتكاك المركبة المحضرة نتائج قساوة جيدة أفضل من قساوة مادة الاحتكاك التجارية (COM)، ويعود ذلك إلى استخدام صخور البازلت والطف البركاني ذات القساوة العالية نسبياً كمادحت وسحل. بشكل عام، أظهرت مواد الاحتكاك المركبة المحضرة توافقاً في تحسّن قساوتها ومقاومتها للانعطاف.

يبين الجدول (4) ملخص نتائج خصائص الوزن النوعي، والمسامية، والخصائص الميكانيكية لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة والانحراف المعياري لهذه النتائج.

الجدول (4): ملخص نتائج مواد الاحتكاك المركبة المحضرة والتجارية.					
الخصائص الميكانيكية			خصائص الوزن النوعي والمسامية		مادة الاحتكاك المركبة
قساوة برينل (HB)	معامل يونغ E(GPa)	مقاومة الانعطاف σ_{fs} (MPa)	المسامية V_p (%)	الوزن النوعي التجريبي ρ_{ex} (g/cm ³)	
41.290 \mp 3.204	6.382 \mp 0.229	32.992 \mp 1.516	2.677 \mp 0.186	2.532 \mp 0.005	F20BS
60.273 \mp 4.130	11.510 \mp 1.168	41.536 \mp 2.001	3.110 \mp 0.228	2.556 \mp 0.006	F20B15S
43.118 \mp 1.247	9.141 \mp 0.273	41.116 \mp 3.572	2.445 \mp 0.742	2.617 \mp 0.020	F20BS20
36.346 \mp 2.996	8.861 \mp 0.636	39.544 \mp 3.697	2.849 \mp 0.292	2.656 \mp 0.008	F20BSC10
55.944 \mp 3.978	12.512 \mp 0.285	53.291 \mp 2.9	0.729 \mp 0.168	2.770 \mp 0.005	F20BSC5
58.094 \mp 4.516	12.520 \mp 0.729	53.570 \mp 7.419	1.430 \mp 0.378	2.886 \mp 0.011	F17BS
22.808 \mp 3.272	9.209 \mp 0.988	43.823 \mp 6.469	-	2.074 \mp 0.031	COM

5. الاستنتاجات والتوصيات.

1.5 الاستنتاجات.

1. أقام هذا العمل الدليل على إمكانية تحضير مواد احتكاك مركبة تُظهر خصائص مقاومة انعطاف وقساوة ملائمة لتطبيقات بطانات مكابح السيارات، واعتمد تحضير هذه المواد على مواد أولية محلية واسعة الانتشار ومنخفضة الكلفة، وعلى مخلفات صناعية محلية رخيصة السعر.
2. تُمكن توليفة مكونات مواد الاحتكاك المركبة المحضرة من ضبط خصائصها بإجراء تغييرات طفيفة على نسب مكوناتها.
3. انخفضت المسامية لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة بنسبة تتراوح بين (46%-72%) مع زيادة النسبة الوزنية لكل من البازلت، والطف البركاني، وكبريتات الباريوم، وألياف الفولاذ،
4. ازدادت المسامية لمواد الاحتكاك المحضرة بنسبة طفيفة مع زيادة النسبة الوزنية لهباب الفحم وألياف البازلت،
5. تحسنت مقاومة الانعطاف لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة بنسبة تتراوح بين (25%-62%) مع زيادة النسبة الوزنية لكل من كبريتات الباريوم، وألياف الفولاذ، والبازلت، والطف البركاني،
6. تحسنت قساوة برينل لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة بنسبة تتراوح بين (36%-46%) مع زيادة النسبة الوزنية لكل من كبريتات الباريوم، وألياف الفولاذ، والبازلت، والطف البركاني،
7. تراجع قساوة برينل لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة بنسبة طفيفة مع زيادة النسبة الوزنية لكل من ألياف البازلت، وهباب الفحم.

2.5 التوصيات.

1. العمل على التحكم الدقيق بالخصائص الميكانيكية لمواد الاحتكاك المركبة المحضرة عن طريق اجراء تعديل طفيف في نسب مكوناتها،
2. اجراء اختبار الضغط على مواد الاحتكاك المحضرة،
3. اجراء اختبار الامتصاصية لسائل الكبح والماء على مواد الاحتكاك المحضرة،
4. اجراء اختبار الاهتراء على مواد الاحتكاك المحضرة لتحديد معامل الاحتكاك ومعدل الاهتراء،
5. اجراء فحص بنيوي مورفولوجي لسطح مواد الاحتكاك المركبة المحضرة قبل اختبار الاهتراء وبعده، عن طريق المجهر الالكتروني الماسح.

6. المراجع.

- [1] SUNDARKRISHNAA, K. L. (2015). **Friction Material Composites: Copper-/Metal-Free Material Design Perspective** (Vol. 171). Springer.
- [2] COX, R. (2012). **Engineered tribological composites: the art of friction material development** (pp. i-xv). SAE.
- [3] Öztürk, B., & Öztürk, S. (2011). **Effects of resin type and fiber length on the mechanical and tribological properties of brake friction materials**. Tribology Letters, 42(3), 339-350.
- [4] YUN, R., FILIP, P., & LU, Y. (2010). **Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials**. Tribology International, 43(11).
- [5] LE MAITRE, R. W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B., LE BAS, M. J., BONIN, B., & BATEMAN, P. (Eds.). (2005). **Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks**. Cambridge University Press.
- [6] FISHER, R. V., & SCHMINCKE, H. U. (2012). **Pyroclastic rocks**. Springer Science & Business Media.
- [7] SCHMINCKE, H. U. (2007). **The Quaternary volcanic fields of the east and west Eifel (Germany)**. In Mantle plumes (pp. 241-322). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] SCHMID, R. (1981). **Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments**. Geologische Rundschau, 70(2), 794-799.
- [9] SUROJO, E., FADIL, A. I., ARIAWAN, D., MUHAYAT, N., RAHARJO, W. W., & SMARANDHANA, D. F. (2022, November). **Effect of different reinforcement material on characteristics of composite friction brake**. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2499, No. 1, p. 040018). AIP Publishing LLC.
- [10] PRIAMBADA, A. F., SUROJO, E., MUHAYAT, N., Smaradhana, D. F., & Raharjo, W. W. (2022, November). **Influence of alkaline treatment of cantala fiber on flexural strength of composite friction brake**. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2499, No. 1, p. 040009). AIP Publishing LLC.

- [11] SOLOMON, W. C., LILLY, M. T., & SODIKI, J. I. (2018). **Production of asbestos-free brake pad using groundnut shell as filler material.** International Journal of Science and Engineering Invention, 4(12), 21-to.
- [12] MAULANA, I. T., RUSDJA, A. P., SUROJO, E., MUHAYAT, N., & RAHARJO, W. W. (2018, June). **Effect of the Cantala fiber on flexural strength of composite friction brake.** In AIP Conference Proceedings (Vol. 1977, No. 1, p. 030031). AIP Publishing LLC.
- [13] AHMADIJOKANI, F., SHOJAEI, A., ARJMAND, M., ALAEI, Y., & YAN, N. (2019). **Effect of short carbon fiber on thermal, mechanical and tribological behavior of phenolic-based brake friction materials.** Composites Part B: Engineering, 168, 98-105.
- [14] CAI, P., LI, Z., WANG, T., & WANG, Q. (2015). **Effect of aspect ratios of aramid fiber on mechanical and tribological behaviors of friction materials.** Tribology International, 92, 109-116.
- [15] SINGH, T., & PATNAIK, A. (2015). **Performance assessment of lapinus–aramid based brake pad hybrid phenolic composites in friction braking.** Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15(1), 151-161.
- [16] ÖZTURK, B., ARSLAN, F., & ÖZTURK, S. (2013). **Effects of different kinds of fibers on mechanical and tribological properties of brake friction materials.** Tribology Transactions, 56(4), 536-545.
- [17] KRR, K. K. (Ed.). (2016). **Composite materials: processing, applications, characterizations.** Springer.
- [18] CALLISTER, W. D., & RETHWISCH, D. G. (2018). **Materials science and engineering: an introduction** (Vol. 9, pp. 96-98). New York: Wiley.
- [19] ZWEBEN, C., W. S. SMITH, and M. W. WARDLE (1979), **"Test methods for fiber tensile strength, composite flexural modulus, and properties of fabric-reinforced laminates"**, Composite Materials: Testing and Design (Fifth Conference), ASTM International.