



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

Instytut Inżynierii Lądowej

mgr inż. Marta Mielczarek

Ocena wpływu rodzaju i cech lepiszczy asfaltowych oraz wypełniaczy mineralnych na właściwości reologiczne masyków asfaltowych z uwzględnieniem procesów starzenia

Rozprawa doktorska

PhD Thesis

Promotor: dr hab. inż. Mieczysław Słowik, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Bilski

Poznań, 2023

PODZIĘKOWANIA

Bardzo dziękuję moim Promotorom,

dr. hab. inż. Mieczysławowi Słowikowi, prof. PP

i dr. inż. Marcinowi Bilskiemu

za opiekę naukową, nieocenioną pomoc merytoryczną, liczne dyskusje oraz
życzliwość w czasie pisania pracy.

Mojemu **Mężowi** oraz dzieciom **Marysi i Marcelowi** z całego serca dziękuję za
ogromną WYROZUMIAŁOŚĆ, nieustanne wsparcie oraz ciągłą motywację do
pracy.

Rodzinie oraz przyjaciołom serdeczne podziękowania za ich „ciągłe”
zainteresowanie i „długie” motywujące rozmowy.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE.....	6
SUMMARY.....	8
PODSTAWOWE SKRÓTY I DEFINICJE.....	9
1. WPROWADZENIE.....	10
2. STUDIUM LITERATURY DOTYCZĄCEJ ANALIZY WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW, WYPEŁNIACZY I MASTYKSÓW ASFALTOWYCH....	13
2.1. Właściwości lepkosprężyste asfaltów modyfikowanych.....	13
2.1.1. Zastosowanie polimerów do modyfikacji asfaltów.....	14
2.1.2. Procesy starzenia zachodzące w asfaltach.....	19
2.2. Właściwości strukturalne oraz funkcjonalne wypełniaczy mineralnych i mastyksów.....	22
2.2.1. Rola wypełniacza w mieszance mineralno-asfaltowej.....	22
2.2.2. Wpływ wypełniacza mineralnego na właściwości reologiczne mastyksu.....	24
2.3. Modelowanie zjawisk reologicznych.....	30
3. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY.....	37
4. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW.....	39
4.1. Asfalty modyfikowane elastomerem SBS.....	39
4.2. Wypełniacze mineralne.....	41
4.3. Mastyksy asfaltowe.....	43
5. METODYKA BADAŃ WYPEŁNIACZY, LEPIECZY I MASTYKSÓW ASFALTOWYCH.....	47
5.1. Właściwości strukturalne wypełniaczy mineralnych.....	47
5.2. Podstawowe cechy asfaltów i mastyksów.....	53
5.3. Właściwości reologiczne asfaltów i mastyksów.....	57
5.4. Ocena morfologii asfaltów i mastyksów na podstawie obrazów mikroskopowych.....	65
5.5. Metody statystyczne stosowane do wyznaczenia niepewności pomiarowych oraz istotności wyników.....	67
6. WYNIKI BADAŃ WYPEŁNIACZY, LEPIECZY I MASTYKSÓW ASFALTOWYCH ORAZ ICH ANALIZA.....	75

6.1.	Wyniki badań wypełniaczy mineralnych	75
6.2.	Podstawowe właściwości lepiszczy i mastyksów asfaltowych...	77
6.3.	Badania w reometrze dynamicznego ścinania DSR.....	83
6.4.	Badanie lepiszczy w reometrze zginanej belki BBR.....	106
6.5.	Badanie zjawiska relaksacji z zastosowaniem duktylometru....	114
6.6.	Ocena morfologii asfaltów i mastyksów modyfikowanych kopolimerem SBS na podstawie obrazów mikroskopowych.....	131
6.7.	Analiza korelacji pomiędzy właściwościami strukturalnymi wypełniacza a parametrami funkcjonalnymi mastyksów asfaltowych.....	138
6.8.	Dyskusja	142
7.	WNIOSKI	146
	BIBLIOGRAFIA.....	148
	ZAŁĄCZNIKI.....	154

STRESZCZENIE

Ocena wpływu rodzaju i cech lepiszczy asfaltowych oraz wypełniaczy mineralnych na właściwości reologiczne mastyksów asfaltowych z uwzględnieniem procesów starzenia.

Niniejsza praca obejmuje badania i analizy mastyksów z wykorzystaniem różnych wypełniaczy mineralnych i asfaltów bazowych modyfikowanym kopolimerem SBS. Przedmiotem badań i analiz były asfalty modyfikowane metodą laboratoryjną, poprzez komponowanie asfaltu 50/70 z koncentratem asfaltu modyfikowanego o zawartości elastomeru 9%, uzyskując asfalty o zawartości kopolimeru 3%, 5%, 7% oraz 9%. Do struktury każdego asfaltu bazowego wprowadzono wypełniacz mineralny: wapienny, bazaltowy lub granodiorytowy, uzyskując tym sposobem mastyksy różniące się zarówno zawartością polimeru w lepiszczu asfaltowym jak i zastosowanym wypełniaczem mineralnym. Oznaczono podstawowe właściwości strukturalne badanych wypełniaczy mineralnych. W celu określenia wpływu procesów starzenia na właściwości reologiczne uzyskanych mastyksów, wszystkie badane mastyksy poddano starzeniu technologicznemu symulowanemu w warunkach laboratoryjnych metodą laboratoryjną RTFOT. Mastyksy oraz lepiszcza asfaltowe będące przedmiotem analiz w niniejszej dysertacji zostały poddane zarówno badaniom cech podstawowych, jak i w szerokim zakresie oznaczono ich właściwości reologiczne. Przeprowadzono badanie ścinania mastyksów w reometrze dynamicznego ścinania (DSR) przy zastosowaniu zróżnicowanych warunków pomiarowych dotyczących zarówno obciążenia, jak i temperatury (w zakresie $-36^{\circ}\text{C} \div 82^{\circ}\text{C}$). Następnie poddano ocenie właściwości niskotemperaturowe lepiszczy asfaltowych w reometrze zginanej belki (BBR) w temperaturze -16°C , -24°C oraz -32°C . Dokonano również obserwacji zjawiska relaksacji asfaltów i mastyksów w duktylometrze w temperaturze -12°C w warunkach stałego odkształcenia. Na podstawie wyników badań zjawiska relaksacji naprężeń w asfaltach i mastyksach dokonano modelowania matematycznego, polegającego na aproksymacji wyników z użyciem modeli ośrodków lepkosprężystych. Jako dopełnienie przeprowadzonych analiz

wykonano korelacje właściwości strukturalnych zastosowanych wypełniaczy z uzyskanymi parametrami reologicznymi mastyksów.

SUMMARY

Evaluation of the impact of the type and characteristics of bituminous binders and mineral fillers on the rheological properties of asphalt mastics taking into account aging processes.

This dissertation included research and test results analysis of mastics containing various mineral fillers and bitumens modified with SBS copolymer (PMB). The subject of the research were bitumens modified by the laboratory method, by composing bitumen 50/70 with PMB concentrate of containing 9% of SBS elastomer, obtaining bitumens with copolymer content of 3%SBS, 5%SBS, 7%SBS and 9%SBS. A limestone, basalt and granodiorite fillers were introduced into the structure of each base bitumen, thus obtaining mastics that differed in both the polymer in the binder content and the mineral filler used. The basic structural properties of the tested mineral fillers were determined. In order to determine the influence of aging processes on the rheology of obtained asphalt mastics, all tested mastics were subjected to aging simulated by the RTFOT laboratory method. Mastics and bitumens analyzed in this dissertation have been subjected to both basic tests and a wide range of rheological properties. The shear test of mastics and bitumen were carried out in a dynamic shear rheometer (DSR) using various measurement conditions, both loads and temperature (in the range of -36°C to 82°C). Next, low-temperature properties of asphalt binders were assessed in bending beam rheometer (BBR) at temperature of -16°C, -24°C and -32°C. The phenomenon of relaxation of bitumens and mastics was also observed in a ductilometer at a temperature of -12°C under conditions of constant strain. On the basis of results of research on the phenomenon of stress relaxation in asphalt binders and mastics, mathematical modeling was carried out, consisted in approximation of the results by using viscoelastic models. As a complement, correlations of the structural properties of the fillers used with the obtained rheological parameters of the asphalt mastics were made.

PODSTAWOWE DEFINICJE I SKRÓTY

asfalt wyjściowy – asfalt drogowy 50/70 stanowiący podstawę podczas sporządzania asfaltów modyfikowanych zawierających kopolimer SBS

asfalt bazowy – asfalt, z udziałem którego sporządzono mastyksy; w pracy asfalty bazowe to 50/70, 3%SBS, 5%SBS, 7%SBS, 9%SBS niestarzone oraz poddane starzeniu metodą RTFOT

mastyks asfaltowy – mieszanina asfaltu bazowego oraz wypełniacza mineralnego w odpowiednich proporcjach (w niniejszej rozprawie doktorskiej zastosowano stosunek objętościowy wypełniacza do asfaltu $W/A=0,60$)

wypełniacz mineralny – wypełniacz pochodzenia mineralnego, w pracy użyto wypełniacz: wapienny, granodiorytowy oraz bazaltowy

mastyks wapienny – mieszanina asfaltu bazowego oraz wypełniacza wapiennego

MMA – mieszanka mineralno-asfaltowa

SBS – kopolimer styren-butadien-styren

PMB – asfalt modyfikowany polimerem (ang. Polymer Modified Bitumen)

BBR – reometr zginanej belki (ang. Bending Beam Rheometer)

DSR – reometr dynamicznego ścinania (ang. Dynamic Shear Rheometer)

DTT – metoda rozciągania bezpośredniego (ang. Direct Tension Test)

RTFOT – metoda laboratoryjna symulująca starzenie krótkookresowe (technologiczne) asfaltu (ang. Rolling Thin Film Oven Test)

MSCR – test pełzania z odprężeniem (ang. Multiple Stress Creep and Recovery test)

WW – wypełniacz wapienny

WB – wypełniacz bazaltowy

WG – wypełniacz granodiorytowy

3%SBS RTFOT+WB – symboliczny zapis (przykładowy) mastyksu sporządzonego z udziałem asfaltu o zawartości kopolimeru SBS równej 3% poddanego starzeniu metodą RTFOT, z wypełniaczem bazaltowym

1. WPROWADZENIE

Górne warstwy nawierzchni drogowych w Polsce najczęściej są wykonywane z mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA). Składają się one głównie z odpowiednio dobranego pod względem uziarnienia kruszywa, lepiszcza asfaltowego i wypełniacza mineralnego. Zastosowany w mieszance wypełniacz powoduje zmiany właściwości reologicznych dodanego asfaltu, tzw. lepiszcza efektywnego. Połączenie wypełniacza oraz asfaltu tworzy mastyks asfaltowy, którego właściwości istotnie wpływają na parametry otrzymanej MMA, m.in. na urabialność, zagęszczalność, odporność na deformacje trwałe nawierzchni czy też spękania niskotemperaturowe.

Pierwsze nawierzchnie drogowe budowano przy użyciu asfaltu naturalnego. Były one bardzo trwałe i odporne na działanie czynników atmosferycznych, co przypisywano głównie unikalnym właściwościom zastosowanych asfaltów naturalnych. Uzyskiwane są m.in. z jezior asfaltowych, aktualnie największe złoża są położone w Trynidad i Tobago. Asfalt naturalny tworzy kompozyt, w którego skład wchodzi również drobne pyły mineralne. Poprzez ich zawartość wykazuje właściwości usztywniające MMA, a tym samym charakteryzuje się odpornością nawierzchni na zmiany temperatury czy obciążenie ruchem. Dopiero z początkiem XX wieku do budowy nawierzchni drogowych zaczęto wykorzystywać asfalty pochodzące z destylacji ropy naftowej. Asfalty te znacznie różnią się pod względem właściwości reologicznych w stosunku do asfaltów naturalnych, a także pod względem składu, ponieważ nie zawierają drobnych cząstek mineralnych. Ich właściwości zależą głównie od procesów destylacji i utleniania zachodzących podczas rafinacji ropy naftowej. Natomiast w każdej MMA powstaje podczas produkcji połączenie asfaltu i wypełniacza dając mastyks; to właśnie właściwości reologiczne powstałego mastyksu w dużej mierze rzutują na zachowanie się mieszanki mineralno-asfaltowej [Grabowski, 2007]. Zatem począwszy od procesu produkcji, wbudowania, jak i eksploatacji zachowanie się w nawierzchni MMA jest uzależnione od właściwości powstałego mastyksu. Lepiszczce asfaltowe połączone z wypełniaczem mineralnym stanowi fazę ciągłą MMA, która zależy zarówno od właściwości zastosowanego asfaltu jak i właściwości strukturalnych wypełniacza mineralnego (dominującą rolę odgrywa powierzchnia właściwa oraz zawartość wolnej przestrzeni) [Grabowski,

2007]. Zatem występuje potrzeba wykonania szczegółowych badań wpływu wypełniaczy różnego pochodzenia na właściwości reologiczne powstałych mastyksów. Wypełniacze są to kruszywa o uziarnieniu do 0,125 mm (zgodnie z WT-1, 85% ziaren powinno mieć wymiar poniżej 0,125 mm). Tradycyjnie podczas produkcji MMA stosuje się mączki wapienne, ale coraz częściej pojawiają się materiały odpadowe tj. pyły powstające podczas procesu odpylania kruszyw w trakcie produkcji MMA czy też popioły lotne z elektrowni. Zawartość lepiszcza asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej to około 10-15% (v/v) [WT-2]. Natomiast wg [Gaweł i inni, 2014] to właśnie asfalt jest w 90% odpowiedzialny za spękania niskotemperaturowe, 60% za trwałość zmęczeniową a w 40% za deformacje trwałe powstające w eksploatowanej nawierzchni. Mastyks asfaltowy w MMA z reguły składa się z 60-80% lepiszcza asfaltowego oraz 20-40% wypełniacza mineralnego (objętościowo) [Mazurek, 2019A]. W związku z tym właściwości reologiczne mastyksów odgrywają duże znaczenie w procesach zachodzących w MMA. Poznanie charakterystyki reologicznej powstałych mastyksów w szerokim zakresie temperatur eksploatacyjnych (zarówno niskich, jak i wysokich) jest w stanie dostarczyć dodatkowych informacji o zachowaniu się oraz trwałości powstałej MMA. Należy również wziąć pod uwagę nowe technologie produkcji i modyfikacji asfaltów wprowadzające na rynek lepiszcza modyfikowane polimerami (PMB). Są one coraz częściej wykorzystywane w budownictwie drogowym, a tym samym istotnym jest określenie wpływu polimeru na właściwości reologiczne powstałego mastyksu w MMA.

W niniejszej rozprawie doktorskiej podjęto się oceny wpływu rodzaju i cech lepiszczy asfaltowych oraz wypełniaczy mineralnych na właściwości reologiczne sporządzonych mastyksów asfaltowych. W programie badawczym szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia związane z wpływem procesu starzenia lepiszczy w mastyksach asfaltowych, które zmieniają właściwości etapie produkcji, jak i w budowania w nawierzchnię drogową. Jak również wprowadzono do programu badań lepiszcza asfaltowe zawierające kopolimer SBS, co istotne o znanej ilości kopolimeru w badanym asfalcie. Dokonano oceny wpływu zawartości zastosowanego kopolimeru SBS na właściwości reologiczne utworzonych mastyksów asfaltowych.

Problemem naukowym podjętym w niniejszej dysertacji jest reologiczna charakterystyka wybranych materiałów stosowanych do budowy nawierzchni drogowych, zawierających lepiszcza asfaltowe. Przedmiotem badań były mastyksy, stanowiące lepiszcze efektywne w składzie każdej MMA. Mastyksy sporządzono poprzez połączenie asfaltu i wypełniacza mineralnego w odpowiednich proporcjach. Zastosowano asfalt drogowy 50/70 i asfalty modyfikowane zawierające kopolimer SBS (3%SBS, 5%SBS, 7%SBS oraz 9%SBS), niestarzone oraz poddane starzeniu metodą RTFOT. Podczas tworzenia mastyksów wykorzystano trzy wypełniacze mineralne: wapienny, bazaltowy oraz granodiorytowy. W niniejszej dysertacji do rozwiązania opisanego uprzednio problemu naukowego wykorzystano metody badawcze pozwalające określić właściwości materiałów składowych tj. wypełniaczy i lepiszczy asfaltowych, jak i właściwości reologiczne otrzymanych mastyksów. Oznaczono właściwości strukturalne zastosowanych wypełniaczy mineralnych tj. powierzchnia właściwa wg metody Blaine'a, zawartość wolnej przestrzeni wg Rigdena, gęstość oraz wskaźnik błękitu metylenowego. Następnie wykorzystano metody pozwalające określić właściwości lepkosprężyste lepiszczy i mastyksów asfaltowych poprzez wykonanie badań w szerokim zakresie temperatur pomiarowych: podstawowe cechy, tj. penetracja i temperatura mięknięcia, jak i zaawansowane, wykorzystujące reometr dynamicznego ścinania DSR, reometr zginanej belki BBR oraz duktylometr. Wykonano test ścinania przy sinusoidalnym wymuszeniu w reometrze dynamicznego ścinania DSR przy zróżnicowanej temperaturze pomiaru od -36°C do 82° oraz test pełzania z odprężeniem (MSCR). Testy rozciągania lepiszczy oraz mastyksów asfaltowych wykonano w duktylometrze wyposażonym w mechanizm rejestrujący wartość siły rozciągającej, obserwując zjawisko relaksacji naprężeń w temperaturze -12°C . Właściwości niskotemperaturowe zastosowanych lepiszczy asfaltowych oznaczono w reometrze zginanej belki BBR. Ważnym elementem programu badawczego była analiza statystyczna wariancji dwuczynnikowej określająca wpływ zastosowanych wypełniaczy oraz kopolimeru SBS w lepiszczu asfaltowym na wskaźnik koleinowania sporządzonych mastyksów. Zjawisko relaksacji obserwowane podczas testu w duktylometrze poddano modelowaniu wykorzystując wybrane modele ośrodków lepkosprężystych.

2. STUDIUM LITERATURY DOTYCZĄCEJ ANALIZY WŁAŚCIWOŚCI ASFALTÓW, WYPEŁNIACZY I MASTYKSÓW ASFALTOWYCH

2.1. Właściwości lepkość-prężyste asfaltów modyfikowanych

Asfalt jako materiał stosowany do budowy nawierzchni drogowych jest znany od wieków. Pierwsze odnotowane użycie asfaltu przez Sumerów datuje się na IV w.p.n.e., były to bloki kamienne spojone zaprawą asfaltową. Informacje na temat stosowania asfaltów naturalnych datuje się wiek XV. Dotyczą one zastosowania asfaltu do zabezpieczeń statków morskich. W budownictwie drogowym pierwsze informacje o użyciu asfaltu datuje się pierwszą połowę XIX w. we Francji, gdzie ułożono pierwszą nawierzchnię w postaci płyt asfaltowych [Gaweł i inni, 2014]. Pierwsze drogi były wykonywane z użyciem asfaltów naturalnych. Dopiero pod koniec XIX wieku w Stanach Zjednoczonych Ameryki odkryto proces otrzymywania asfaltów podczas destylacji ropy naftowej. Asfalt ropy naftowej jest to mieszanina wielkocząsteczkowa węglowodorów i związków heterocyklicznych, które tworzą układ koloidalny. Składa się głównie z trzech grup składników tj.: asfalteny, żywice oraz oleje. Asfalt używany do produkcji MMA jest najcięższą frakcją ropy naftowej, początkowo traktowany był jako odpad podestylacyjny. Otrzymuje się go poprzez poddanie ropy naftowej destylacji atmosferycznej, następnie próżniowej. Ostatni etap tej produkcji stanowi jedno z trzech rozwiązań: destylacja pośrednia, utlenianie lub komponowanie [Trzaska, 2014; Gaweł i inni, 2014]. Pochodzenie ropy naftowej wpływa w znacznym stopniu na właściwości asfaltu, jednak asfalty otrzymywane z tego samego typu ropy naftowej również mogą różnić się składem czy też strukturą asfaltu wyjściowego. Wpływa na to wiele czynników tj. sposób i warunki ich otrzymywania asfaltów [Gaweł i inni, 2014].

Nawierzchnie drogowe w dzisiejszych czasach są poddawane coraz to większym obciążeniom wywołanym ruchem drogowym [Andrzejczak, 2012]. Sytuacja ta wymaga stosowania nowych rozwiązań materiałowych w konstrukcjach nawierzchni. W związku z tym właściwości reologiczne asfaltów

drogowych ponaftowych (niemodyfikowanych) są niewystarczające, w związku z tym należy wprowadzać do ich struktury różnego rodzaju modyfikatory.

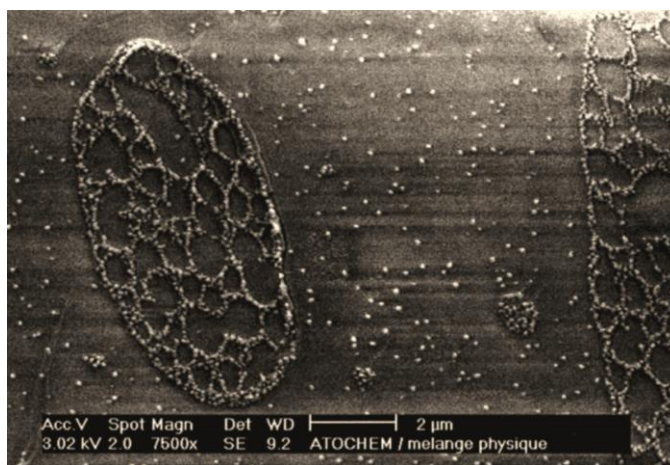
Pierwsze dane literaturowe odnośnie wykorzystania asfaltów modyfikowanych polimerami PMB (Polymer Modified Bitumen) sięgają wczesnych lat siedemdziesiątych XX wieku [Mandal i inni, 2015]. Zagadnienia dotyczące modyfikacji asfaltów są tematem licznych prac badawczych prowadzonych zarówno w kraju, jak i w wielu ośrodkach zagranicznych. W niniejszym rozdziale dokonano analizy najczęściej spotykanych sposobów modyfikacji asfaltów. Szczególną uwagę zwrócono jednak na asfalty modyfikowane kopolimerem SBS, ponieważ jest to zagadnienie bezpośrednio związane z tematem niniejszej pracy. Mastyksy asfaltowe będące przedmiotem badań sporządzono poprzez połączenie, w ustalonych proporcjach, asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS z wypełniaczami mineralnymi.

2.1.1. Zastosowanie polimerów do modyfikacji asfaltów

Od dawna znany jest korzystny wpływ polimerów na poprawę właściwości reologicznych lepiszczy, zwłaszcza na poszerzenie zakresu ich lepkości. Najczęściej wykorzystywane polimery do modyfikacji asfaltów drogowych to elastomery, które tworzą z asfaltem strukturę usieciowaną lub mieszaninę [Gaweł i inni 2014]. Można zaobserwować ogromną różnorodność wśród asfaltów modyfikowanych polimerami, zwanymi polimeroasfaltów, pochodzących z różnych partii produkcji, czy też od różnych producentów. Najczęściej używany wśród elastomerów jest kopolimer SBS (styren-butadien-styren) o strukturze dwu- lub trójblokowej, bądź nieuporządkowanej (np. styren-butadien-random (SBR)) [Read i Whiteoak, 2003]. Elastomery SBS mają właściwości mechaniczne porównywalne z kauczukiem wulkanicznym, natomiast są usieciowane tylko fizycznie. Usieciowanie to może być chwilowo zniszczone pod wpływem działania wysokich temperatur (powyżej temperatury zeszklenia polistyrenu, czyli powyżej 100°C), jednak po ochłodzeniu usieciowanie to odbudowuje się (regeneruje) [Airey, 2003]. Dodanie kopolimeru SBS do asfaltu powoduje absorpcje maltenów (części olejowej) zawartych w asfalcie, który po wymieszaniu pęcznieje nawet dziewięciokrotnie w stosunku do początkowej objętości [Isacson, 1995]. Mówiąc o modyfikacji asfaltu polimerami trzeba wziąć

pod uwagę jednorodność lepiszcza modyfikowanego. Bardzo ważna jest kompatybilność asfaltu z elastomerem SBS, zarówno podczas przechowywania, transportu, jak i produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej. W dużej mierze zależy to od rozpuszczalności polimerów w asfalcie. Wpływ ma na to wiele czynników tj.: różnica rozpuszczalności polimerów oraz maltenów w asfalcie, zawartość oraz rodzaj asfaltenów w asfalcie, masa cząsteczkowa składników, lepkość asfaltu oraz parametr rozpuszczalności [Sun i Weinin, 2003]. Asfalty modyfikowane polimerami mają skłonność do rozdzielania się faz, w czasie przechowywania i transportu, z reguły w dolnej części gromadzi się faza zawierająca asfalteny, natomiast w górnej części faza polimerowa. Autorzy pracy [Lu i Isacson, 1999] wykazali, iż bardzo duże znaczenie ma zastosowany asfalt stanowiący podstawę (skład grupowy asfaltu, w szczególności zawartość asfaltenów), właściwości i procentowy udział polimeru oraz zastosowana technologia modyfikacji. Dąży się, aby mikrostruktura polimeroasfaltów była jednorodna i niezmienna w czasie. Stałość struktury wewnętrznej może warunkować niezmiennie właściwości reologiczne asfaltów modyfikowanych. Stosuje się zaawansowane techniki pomiarowe pozwalające kontrolować kompatybilność polimeroasfaltów, jedną z nich jest metoda wykorzystująca mikroskop fluorescencyjny oraz analizę obrazu. Metoda wizualna oceny rozkładu polimeru w asfalcie modyfikowanym pod mikroskopem fluorescencyjnym polega na wzbudzaniu iluminacji badanych materiałów światłem ultrafioletowym. Przeprowadzając badanie, zauważalna jest różnica w iluminacji fazy polimerowej i asfaltowej. Polimer zazwyczaj jest widoczny w kolorze żółtym, natomiast asfalt w kolorze od brązowego po czarny [Król, 2008]. W wielu pracach badawczych poddano analizie obrazy mikroskopowe lepiszcza modyfikowanego; zaobserwowano, iż asfalty o niskim stopniu modyfikacji mają polimer równomiernie rozłożony (układ dyspersyjny) w ciągłej fazie asfaltowej. Natomiast wraz ze wzrostem zawartości polimeru pojawia się ciągła faza polimerowa. Jest to zależne od wielu czynników, ale fazę ciągłą polimeru można zaobserwować już przy ilości kopolimeru SBS równej 6% [Król, 2008; Gawęł i inni, 2014]. Niezależnie jednak od charakteru faz w polimeroasfalcie stabilność podczas przechowywania i transportu lepiszczy zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości polimeru w asfalcie modyfikowanym [Isacson i inni, 1999]. Zagadnieniom stabilności asfaltów modyfikowanych

kopolimerem SBS poświęcono liczne prace badawcze [Lu i inni, 1999; Wilson i inni, 2000; Daguan i Weimin, 2003]. Przedstawiono w nich wyniki badań wykonanych z wykorzystaniem różnych metod pomiarowych. Autorzy prac [Lu i inni, 1999] oraz [Daguan i Weimin, 2003] przedstawili badania wykonane metodą tzw. „testu tubowego”. Badane asfalty modyfikowane kopolimerem SBS umieszczono w tubach, następnie termostatowano w ten sposób przygotowane próbki przez 3 doby w temperaturze 180°C (Daguan i Wiemin termostatowali próbki w temperaturze 163°C). W celu rozformowania, przygotowane formy zamrożono (do temperatury -10°C) i przecięto poziomo na trzy części. Dolną oraz górną część próbki poddano badaniom, w których oznaczono temperaturę mięknięcia, dynamiczny moduł ścinania oraz kąt przesunięcia fazowego w reometrze dynamicznego ścinania DSR oraz dokonano analizy obrazów uzyskanych przy użyciu mikroskopu fluorescencyjnego.



Rys. 2.1. Obraz spęczniałej struktury kopolimeru SBS w asfalcie modyfikowanym o charakterystycznej budowie „plastra miodu” [Wilson i inni, 2000]

Badania oraz ich analizy wykazały, iż duże znaczenie w zachowaniu jednorodności lepiscza modyfikowanego ma zastosowany asfalt podstawowy (jego skład oraz pochodzenie) oraz zawartość i rodzaj użytego polimeru. Mniejsza separacja faz następuje, jeżeli do modyfikacji zastosuje się asfalt o większej zawartości środków aromatycznych. Ryzyko separacji jest większe w przypadku asfaltów o dużej zawartości asfaltenów. Rozdzieleniu się faz sprzyja również zastosowanie elastomeru SBS o strukturze radialnej, mniejsze ryzyko występuje w przypadku struktury liniowej tego polimeru. Autorzy [Wilson i inni, 2000] przedstawili sposób oceny separacji polimeru za pomocą analizy

obrazów wykonanych przy użyciu „krio-skaningowej” mikroskopii elektronowej (ang. *cryo-scanning electron microscopy*). Niewielką kroplę rozgrzanego lepiszcza umieszczono na szklanej płytce i zamrażano za pomocą ciekłego azotu (w temperaturze -202°C). Badania przy użyciu mikroskopu przeprowadzono w temperaturze -160°C . Zaobserwowano spęczniałą frakcję polimerową (rys. 2.1) w fazie ciągłej asfaltu.

Zastosowanie polimerów, a w szczególności kopolimeru SBS cieszy się uznaniem od wielu lat, również w naszym kraju. W Polsce grupa badaczy z Instytutu Badań Dróg i Mostów w Warszawie już w latach 90. XX wieku podjęła się badań pod kierownictwem prof. D. Sybilskiego dotyczących asfaltów modyfikowanych elastomerem SBS [Sybilski, 1993; Sybilski, 1994; Sybilski, 1996; Sybilski, 1997; Sybilski i Horodecka, 1997]. Głównie skupiono się na oznaczeniu podstawowych właściwości reologicznych badanych asfaltów modyfikowanych. Wyniki badań wpływu modyfikacji asfaltów elastomerami pozwoliły autorom zaobserwować następujące efekty tj.: zmniejszenie wartości penetracji, przyrost wartości temperatury mięknięcia T_{PIK} oraz lepkości dynamicznej, rozszerzenie temperaturowego zakresu lepkością dynamiczną, większa odporność na starzenie krótkookresowe (technologicznego) symulowanego metodą RTFOT, zwiększenie kohezji oraz poprawa przyczepności asfaltów do kruszyw mineralnych. Według [Radziszewski, 2008], właściwości asfaltów modyfikowanych elastomerem SBS należy oceniać głównie po procesie starzenia (RTFOT i PAV), gdyż są zależne zarówno od procesu utleniania asfaltów, ale również od stopnia rozpadu łańcucha polimeru.

Na początku lat 90. XX wieku opracowano w USA nowoczesne metody badań lepiszczy asfaltowych w ramach Strategicznego Drogowego Programu Badawczego (SHRP), jednocześnie przedstawiono specyfikacje techniczne Superpave. Specyfikacje te wdrażały nowoczesne metody badań, m.in. ocena właściwości niskotemperaturowych tj. metodą z wykorzystaniem reometru zginanej belki BBR (ang. *Bending Beam Rheometer*) oraz test bezpośredniego rozciągania DTT (ang. *Direct Tensile Test*), jak również reometr dynamicznego ścinania DSR (ang. *Dynamic Shear Rheometer*) do oceny właściwości reologicznych w szerokim zakresie temperatur. Wprowadzono również metody symulujące starzenie asfaltów, starzenie zachodzące zarówno podczas produkcji

MMA, jej transportu, wbudowania i zagęszczania (starzenie krótkookresowe RTFOT – ang. Rolling Thin Film Oven Test) oraz starzenie zachodzące podczas eksploatacji nawierzchni drogowej (starzenie długookresowe PAV – ang. Pressure Ageing Vessel). Oceniając właściwości reologiczne asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS bardzo często analizowane jest ich zachowanie w niskich temperaturach. W tym celu głównie wykorzystuje się reometr zginanej belki BBR, test bezpośredniego rozciągania DTT oraz oznaczenie temperatury łamliwości wg Fraassa. Zniszczenia niskotemperaturowe w nawierzchniach z MMA powstają z reguły w wyniku wystąpienia naprężeń wywołanych zmianami temperatury, w warunkach sprzyjających usztywnieniu asfaltu, kiedy staje się on kruchy. W celu określenia odporności asfaltu na działanie niskich temperatur należy oznaczyć moduł sztywności asfaltu pod obciążeniem statycznym [Kalabińska i Piłat, 1982]. W ramach programu SHRP opracowano metodę oznaczania modułu sztywności lepizszy asfaltowych w temperaturach ujemnych na beleczkach asfaltowych w reometrze BBR. Dodatkowo określa się wartość parametru „m”, która mówi o nachyleniu stycznej do wykresu zależności modułu sztywności w funkcji czasu obciążenia próbki. Prof. J. Piłat z zespołem badawczym dokonał szczegółowej analizy właściwości niskotemperaturowych asfaltu drogowego 50/70 oraz asfaltów modyfikowanych polimerami [Piłat i inni, 2010]. Autorzy, kierując się wymaganiami Superpave, przeanalizowali graniczną wartość modułu sztywności równą 300 MPa, powyżej której przyjmuje się, że asfalt pozostaje w stanie sprężystym. Zauważono, iż wyznaczenie temperatury krytycznej tylko na podstawie modułu sztywności jest niewystarczające, ponieważ należy uwzględnić zachowanie asfaltów pod wpływem długotrwałego obciążenia. W związku z tym należy wziąć pod uwagę intensywność zmian wartości modułu sztywności wyrażoną jako parametr „m” (graniczna wartość parametru „m” wprowadzona przez Superpave wynosi 0,3). Na podstawie wykonanych analiz stwierdzono, że polimeroasfalty mają poprawione właściwości niskotemperaturowe i będą wykazywać przejście w stan kruchy w niższej temperaturze niż asfalty drogowe. W przypadku asfaltów modyfikowanych polimerem można to tłumaczyć faktem, iż przyrost modułu sztywności nie

powoduje jednocześnie przyrostu wytrzymałości na kruche pękanie asfaltu, za co odpowiada faza polimerowa w asfalcie.

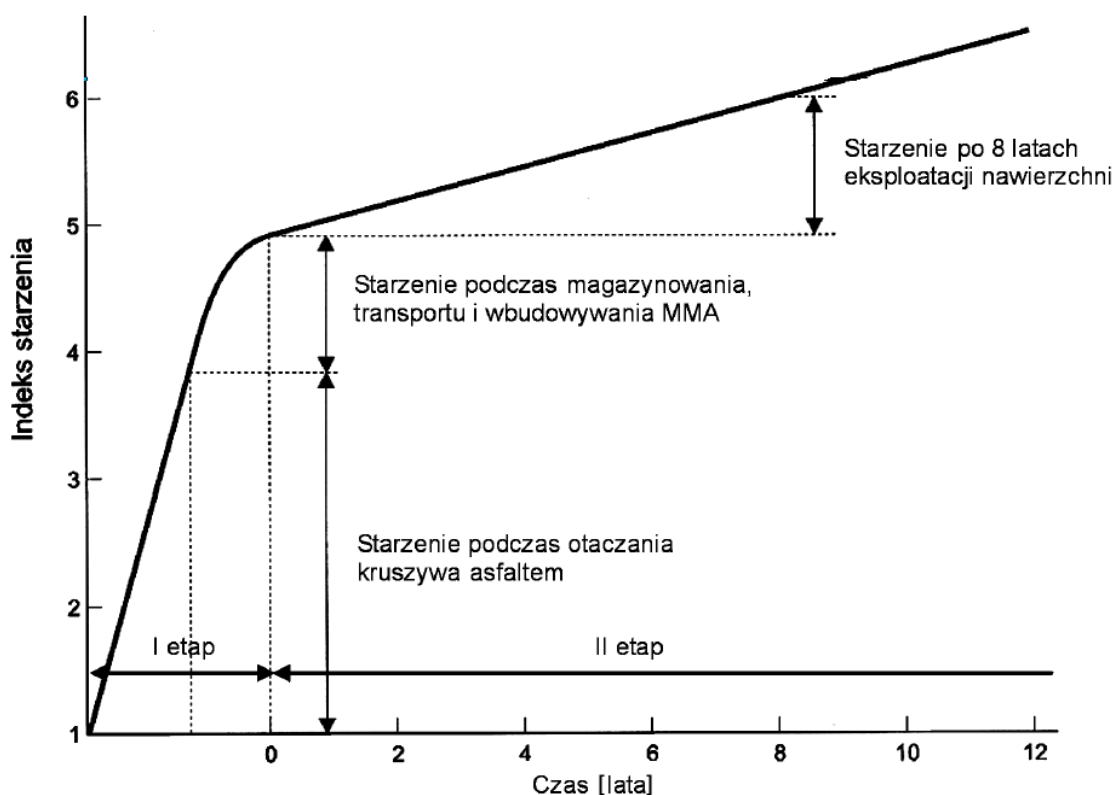
Reometr dynamicznego ścinania jest powszechnie wykorzystywany w wielu ośrodkach badawczych w celu określenia właściwości reologicznych asfaltów modyfikowanych [Airey, 2003; Shenoy, 2008; Słowik, 2013]. Badania prowadzi się stosując wymuszenie sinusoidalne w szerokim zakresie temperatur, wyznaczając tym sposobem dwa podstawowe parametry tj. dynamiczny moduł ścinania $|G^*|$ oraz kąt przesunięcia fazowego δ .

Najczęściej spotykany polimer służący do modyfikacji asfaltów to elastomer SBS, jednak inne polimery również mają zastosowanie wśród modyfikatorów stosowanych w materiałach drogowych do poprawy właściwości lepiszczy asfaltowych. Wśród elastomerów najczęściej stosowane polimery to: kopolimer styren-izopren-styren (SIS), kopolimer styren-butadien statyczny (nieuporządkowany) (SBR).

2.1.2. Procesy starzenia zachodzące w asfaltach

Asfalty uzyskiwane w wyniku destylacji ropy naftowej składają się głównie z asfaltenów, żywic i olejów. Parametry techniczne asfaltu, w wyniku procesów starzenia zmieniają się głównie poprzez długotrwałe działanie czynników zewnętrznych tj. powietrze, wysoka temperatura czy też woda. Dochodzi wówczas do zjawiska starzenia lepiszcza asfaltowego poprzez utlenianie, odparowanie (utrata części olejowej) oraz przemieszczanie się składników oleistych do ziaren kruszywa (tzn. pocenie się). Proces starzenia jaki zachodzi w lepiszczach asfaltowych można podzielić na dwa zasadnicze etapy (rys. 2.2). Pierwszy najbardziej gwałtowny, zachodzi podczas produkcji, transportu, wbudowania oraz zagęszczania MMA, jest to starzenie krótkookresowe (zwane również technologicznym). Dugi etap starzenia, występuje podczas eksploatacji nawierzchni, nazywany jest starzeniem długookresowym (eksploatacyjnym). W składzie MMA to właśnie zastosowane lepiszcze asfaltowe jest najbardziej narażonym składnikiem na starzenie [Radziszewski, 2005; Słowik i Adamczak, 2007]. Dodatkowo wprowadzając do MMA asfalty modyfikowane polimerami zjawisko to jest procesem złożonym, gdyż w wysokich temperaturach może dojść

do degradacji (rozpadu) struktury polimeru (w tym przypadku nie należy rozgrzewać ich do temperatury przekraczającej 200°C).



Rys. 2.2. Wykres przedstawiający proces starzenia lepkości asfaltowych z uwzględnieniem dwóch etapów starzenia [Słowik i Adamczak, 2007]

Utlenianie się części oleistych w asfalcie powoduje nieodwracalne zmiany, co wpływa na pogorszenie się jego właściwości. Głównymi produktami utleniania się asfaltu są ketony oraz sulfotlenki [Gaweł i inni, 2014]. Poprzez odparowanie składników aromatycznych następuje stopniowe zwiększanie ilości asfaltenów w asfalcie, co wpływa na zmianę proporcji fazy dyspersyjnej do zdyspergowanej, a co za tym idzie do zmiany budowy koloidalnej z typu zol-żel na żel [Gaweł i inni, 2014]. Asfalty poddane starzeniu charakteryzują się większą sztywnością, przyrostem lepkości, temperatury mięknięcia T_{PIK} ; temperatury łamliwości wg Fraassa oraz zmniejszeniem penetracji, kąta przesunięcia fazowego oraz zdolności do relaksacji [Mieczkowski, 2016; Zofka, 2014].

Odporność na starzenie lepkości asfaltowego poprawia się poprzez wprowadzenie do struktury asfaltu antyutleniaczy i środków dyspergujących, którymi mogą być np. tłuszcze roślinne i zwierzęce, a także tłuszcze o strukturze

zmodyfikowanej np. imidazoliny [Mieczkowski, 2016; Babiak i inni, 2017]. Wprowadzenie imidazoliny do lepiszcza asfaltowego w procesie produkcji MMA, zgodnie z [Gawęł, 2014; Mieczkowski, 2016], poprawia właściwości lepkie asfaltu. Mogą wpływać również na zmniejszenie lepkości asfaltu, a tym samym obniżenie temperatur ekwiwalentnych procesów otaczania kruszywa lepiszczem asfaltowym oraz układania i zagęszczania warstw z mieszanki mineralno-asfaltowej.

Do oceny odporności lepiszcza asfaltowego na starzenie stosuje się metody laboratoryjne, które symulują procesy zachodzące podczas produkcji, wbudowania, jak i eksploatacji nawierzchni. Jedną z najczęściej stosowanych metod symulujących starzenie technologiczne jest metoda Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), polegająca na umieszczeniu 35 g lepiszcza asfaltowego w szklanej butelce, umieszczeniu w tarczy (obrotowa tarcza, jednocześnie można badać 8 szklanych butelek) i wygrzewaniu ich w temperaturze 163°C przez okres 75 min; w trakcie obrotu tarczy następuje nadmuch powietrza (4l/min). Drugą metodą jest metoda TFOT (Thin Film Oven Test), polegająca na umieszczeniu próbki asfaltu o masie 50 g na stalowej tacy i wygrzewaniu w temperaturze 163°C przez okres 5h. Pierwsza i druga metoda są bardzo zbliżone w założeniach, ponieważ w obu przypadkach zachodzi proces zarówno odparowania jak i utlenienia badanego asfaltu, różnią się jednak zasadniczo czasem wygrzewania próbek lepiszczy asfaltowych. Zdaniem autorów [Słowik i Adamczak, 2007] temperatura podczas starzenia asfaltów powinna być ustalana indywidualnie, w zależności od badanego materiału, ponieważ zwłaszcza w przypadku asfaltów modyfikowanych polimerami, prawidłowe otaczanie kruszywa asfaltem, wbudowanie czy też zagęszczanie wymaga zastosowania wyższej temperatury niż normowe 163°C; czasami są to temperatury rzędu 180 - 190°C.



Rys. 2.3. Aparat do starzenia asfaltów metodą RTFOT

Starzenie eksploatacyjne występujące w nawierzchni najczęściej jest symulowane metodą laboratoryjną PAV (Pressure Ageing Vessel), z tym że badaniu poddaje się próbki już po starzeniu technologicznym. Badanie polega na umieszczeniu 50 g lepiszcza asfaltowego na metalowej tacy (tworząc próbkę o około 3,2 mm wysokości warstwy lepiszcza), następnie należy umieścić je w komorze ciśnieniowo-termicznej zwiększając ciśnienie do 2,1 MPa na okres 20 h. Próbki są poddawane działaniu wysokiej temperatury oraz ciśnieniu przez okres 20 h [Airey, 2003].

2.2. Właściwości strukturalne oraz funkcjonalne wypełniaczy mineralnych i mastyksów

2.2.1. Rola wypełniacza w mieszance mineralno-asfaltowej

Mieszanki mineralno-asfaltowe (MMA) są wykorzystywane do budowy górnych warstw nawierzchni drogowych. Składają się głównie z kruszywa, lepiszcza asfaltowego oraz wypełniacza mineralnego wymieszanych w odpowiednich proporcjach, zależnych od typu MMA. Połączenie fizyczne wypełniacza mineralnego oraz asfaltu nosi nazwę mastyksu asfaltowego (w literaturze również nazywane jest zaczynem asfaltowym). Wpływ wypełniacza na właściwości asfaltu wyjściowego (zmodyfikowane po dodaniu wypełniacza)

zaobserwował pod koniec XIX wieku Richardson [Richardson, 1914]. Mastyks ma wpływ na właściwości otrzymanej mieszanki mineralno-asfaltowej. O końcowych właściwościach nie decydują tylko i wyłącznie właściwości poszczególnych składników, ale wzajemne proporcje pomiędzy nimi, a w szczególności proporcje wypełniacz-lepiszcze. Zauważono, iż wypełniacz wpływa usztywniająco na zastosowane lepiszcze asfaltowe, ale również wykazano, iż duże znaczenie odgrywa rodzaj oraz uziarnienie zastosowanego wypełniacza. W latach 40. XX wieku Rigden zaobserwował korelację pomiędzy właściwościami strukturalnymi wypełniacza, a lepkością mastyksu asfaltowego. Wykazał związek pomiędzy zawartością wolnych przestrzeni w suchym wypełniaczu, a usztywnieniem mastyksu asfaltowego [Rigden, 1947].

Badaniami wpływu rodzaju zastosowanego wypełniacza i lepiszcza asfaltowego na właściwości powstałych mastyksów asfaltowych zajmowano się w wielu ośrodkach naukowych w kraju i za granicą, do dnia dzisiejszego prowadzone są zaawansowane badania mastyksów asfaltowych. Prof. J. Piłat w monografii na temat „wpływu właściwości mączek mineralnych na kształtowanie cech technicznych kompozytów mineralno-asfaltowych” wykazał, iż właściwości funkcjonalne wypełniaczy w MMA istotnie wpływają na [Piłat, 1994]: mrozoodporność, wodoodporność, spójność oraz poprawę przyczepności do powierzchni ziaren kruszywa, czy też odporność na starzenie mastyksów.

W monografii „Struktura a właściwości funkcjonalne wypełniaczy mineralnych stosowanych w drogownictwie” prof. W. Grabowski zwrócił uwagę na morfologię ziaren zastosowanych wypełniaczy mineralnych w zaczynach asfaltowych, czyli kształt i tekstura powierzchni ziaren wypełniacza oraz ich wpływ na właściwości MMA [Grabowski, 2007]. W monografii przedstawiono badania oraz wyniki mastyksów sporządzonych przy udziale zarówno asfaltów drogowych jak i modyfikowanych kopolimerem SBS. Analiza wyników przeprowadzonych badań zaczynów przed i po procesie starzenia technologicznego metodą RTFOT wykazała, iż wypełniacz wapienny obniża wrażliwość termiczną sporządzonych zaczynów oraz zmniejsza wartość indeksu stwardnienia *IS*. Świadczy to o pozytywnym wpływie wypełniacza wapiennego na właściwości mastyksów po starzeniu technologicznym. Badania oraz analizy mastyksów sporządzonych z udziałem asfaltów modyfikowanych elastomerem

SBS również wykazały pozytywny wpływ modyfikacji asfaltu na zmiany indeksu stwardnienia IS , lepkości dynamicznej $\Delta\eta_{90}$ i $\Delta\eta_{110}$ i indeksu penetracji PI , w porównaniu z asfaltem bazowym.

Studia literatury na temat stosowania różnego pochodzenia wypełniaczy w mieszance mineralno-asfaltowej doprowadziły do sformułowania najważniejszych funkcji, jakie powinien spełniać wypełniacz w MMA [Kalabińska i inni, 2008; Grabowski, 2007; Kołodziej i inni, 2011], do których można zaliczyć:

- zapewnienie spójności, wodoodporności oraz mrozoodporności poprzez polepszenie przyczepności lepiscza do powierzchni kruszywa zastosowanego w MMA,
- usztywnienie asfaltu, poprzez dodanie wypełniacza powoduje zmianę właściwości reologicznych asfaltu bazowego,
- wypełnienie wolnych przestrzeni pomiędzy ziarnami kruszywa w MMA.

Wypełniacze mineralne mają tendencję do pęcznienia pod wpływem wody, ponieważ mogą zawierać minerały ilaste. Dopuszczalna zawartość minerałów ilastych oznaczona za pomocą wskaźnika błękitu metylenowego nie powinna przekraczać 10% [WT-1]. Minerale ilaste mają strukturę wewnętrzną w postaci warstwowej (dwu lub trzy warstwowej). Ich cechą charakterystyczną jest zdolność do pochłaniania wody. Może to negatywnie wpływać na właściwości MMA, przyczyniać się do niecałkowitej hydrofobizacji wypełniacza przez lepiscze, a to może dodatkowo powodować obmywanie lepiscza z kruszywa i jego destrukcję [Piłat, 1994; Grabowski, 2007].

2.2.2. Wpływ wypełniacza mineralnego na właściwości reologiczne mastyksów asfaltowych

Podczas procesu mieszania składników mieszanki mineralno-asfaltowej w trakcie produkcji MMA powstaje lepiscze o zmienionych właściwościach, tzw. mastyks asfaltowy. Jego właściwości są zależne od wypełniacza mineralnego zastosowanego w MMA, a szczególnie od jego struktury. Opis struktury wypełniacza, w literaturze technicznej nazywany jest cechami strukturalnymi wypełniacza mineralnego obejmuje: uziarnienie, zawartość wolnych przestrzeni,

powierzchnię właściwą, wskaźnik błękitu metylenowego oraz gęstość wypełniacza.

Kontrola składu ziarnowego wypełniacza jest podstawowym zadaniem podczas oceny wypełniacza przeznaczonego do produkcji MMA, często też jest wykorzystywana do oceny jakości stosowanych wypełniaczy. Wypełniacz, zgodnie z PN-EN 13043 jest to kruszywo, którego większa część przechodzi przez sito 0,063 mm („większa część” wg wymagań technicznych [WT-1] to min. 70%), w celu uzyskania „pewnych właściwości”. Aktualnie do kontroli uziarnienia wypełniacza stosuje się zestaw sit o boku oczka kwadratowego: 0,063; 0,125 oraz 2,00 mm. Badanie przeprowadza się stosując metodę przesiewania w strumieniu powietrza, zgodnie PN-EN 933-10. Szczegółowy opis metody oznaczania składu ziarnowego omówiono w dalszej części pracy dotyczącej opisu badań wypełniaczy. Zawartość wolnych przestrzeni, w literaturze technicznej często nazywana jest porowatością wypełniacza. W praktyce wykorzystuje się kilka metod badawczych różniących się sposobem zagęszczania czy też przekazywaną energią podczas procesu zagęszczania warstwy wysuszonego wypełniacza. W pracy wykorzystano najczęściej wykorzystywaną w laboratoriach drogowych metodę badania wg Rigdena, opisaną w PN-EN 1097-4:2002.

Właściwości funkcjonalne wypełniaczy stosowanych w budownictwie drogowym określa się jako grupę cech związanych z zachowaniem się i wzajemnym oddziaływaniem wypełniacza w mastyksach asfaltowych, a tym samym w nawierzchniach asfaltowych, na właściwości usztywniające, odporność na działanie wody czy też chłonność asfaltu. Wpływ wypełniacza na właściwości usztywniające mastyksów określa się głównie metodami pośrednimi wykonując podstawowe badania mastyksów i lepiszczy bazowych, tj. temperatura mięknienia wg metody „Pierścień i kula” czy też penetracja. Następnie należy obliczyć wskaźniki (ΔT_{PiK} oraz $\Delta Pen_{25^{\circ}C}$) na podstawie pomierzonych wielkości dla mastyksu i lepiszcza asfaltowego. Są one pomocne w procesie projektowania i optymalizacji składu mieszanki mineralno-asfaltowej we wstępnej fazie. Właściwości usztywniające mają istotny wpływ na urabialność podczas produkcji MMA, układanie i zagęszczanie nawierzchni czy też

powstawanie deformacji trwałych i spękań niskotemperaturowych w okresie eksploatacji.

Wzajemne oddziaływanie asfaltu i wypełniacza mineralnego jest w dużej mierze uzależnione od właściwości fizycznych zastosowanych materiałów składowych MMA. Na pierwszy plan wysuwa się, zgodnie z literaturą, powierzchnia właściwa oraz zawartość wolnych przestrzeni w użytym wypełniaczu. Wypełniacze mineralne stosowane w budownictwie drogowym charakteryzują się dużą powierzchnią właściwą rzędu $250 \div 450 \text{ m}^2/\text{kg}$ oraz wysoką energią powierzchniową. Zatem to właśnie wypełniacz w MMA pełni rolę „aktywnego absorbenta” [Stefańczyk i Mieczkowski, 2009]. Wypełniacz jako pierwszy reaguje z cząsteczkami lepiszcza asfaltowego podczas procesu produkcji MMA. Wynika to z faktu, iż wypełniacz mający wysoką energię powierzchniową gromadzi na powierzchni ziaren dodatnie jony kationów, głównie wapnia i magnezu. W wyniku reakcji kationów z zawartymi w asfalcie kwasami organicznymi tworzą się sole organometaliczne. Poprzez silne wiązania kowalencyjne wypełniacz-lepiszcze asfaltowe, powstaje mastyks asfaltowy. W ten sposób powstały mastyks stanowiący fazę ciągłą MMA, pokrywa ziarna kruszyw (fazy rozproszonej). W związku z tym adsorpcyjne właściwości wypełniacza powinno się zachować na optymalnym poziomie, aby zapobiec powstaniu nadmiernego zjawiska usztywniającego w MMA oraz zastosować odpowiednią ilość asfaltu. Właściwości reologiczne mastyksów w głównej mierze odpowiadają za zachowanie MMA w temperaturach eksploatacyjnych, to właśnie elastyczność mastyksu odpowiada za odporność nawierzchni asfaltowej na powstanie odkształceń trwałych, zmęczenie nawierzchni czy spękania niskotemperaturowe. Song z zespołem z Southeast University poddali analizom mastyksy z wypełniaczem wapiennym na bazie asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS, stosując różne proporcje pomiędzy wypełniaczem a asfaltem F/B (filler/bitumen) od 0 do 180% zawartości wypełniacza (masowo). Przeprowadzono zmodyfikowany program badań zgodnie z metodą MSCR wykorzystując naprężenia ścinające w szerokim zakresie: 0,1; 3,2; 6,4 i 12,8 kPa oraz zastosowano zmienną wysokość próbki przy wrzecionie 25 mm (1,0; 1,5 oraz 2,0 mm). Tym samym wykazali, iż uzyskuje się rozbieżne wyniki parametrów testu MSCR w reometrze dynamicznego ścinania DSR stosując różną geometrię

badanych próbek. Ostatecznie zaobserwowali, iż dla mastyksów wapiennych zalecane jest wrzeciono 25 mm i wysokość próbki 1 mm. Co najważniejsze, na podstawie badań zauważono, iż mastyksy sporządzone z udziałem asfaltów modyfikowanych charakteryzując się większą odpornością na koleinowanie, na podstawie wyników oznaczenia parametrów J_{nr} oraz R . Asfalty niemodyfikowane uzyskały niską wartość R oraz wysoką wartość podatności nieodwracalnej. Na podstawie wyników R_{diff} wyznaczyli optymalną zawartość wypełniacza wapiennego w mastyksie na poziomie 1:1 [Song i inni, 2021]. Z kolei [Cardone i inni, 2015] poddali analizie asfalty modyfikowane kopolimerem SBS oraz na ich bazie utworzyli mastyksy z wypełniaczem wapiennym i bazaltowym. Badając właściwości mastyksów z udziałem asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS wykazali w badaniu BBR, iż przyrost modułu sztywności w badaniu BBR dla asfaltu 50/70 nie jest zależny od rodzaju zastosowanego wypełniacza, natomiast istotnie wpływa na zmianę sztywności kombinacja asfalt/wypełniacz/polimer. Dodatkowo przeprowadzając badania właściwości reologicznych w wysokich temperaturach wykonując test MSCR zauważono, że dodanie wypełniacza znacząco wpływa na zmniejszenie wartości J_{nr} , wskazując tym samym większą odporność na odkształcenia trwałe mastyksów, co silnie jest uzależnione od interakcji wypełniacza z asfaltem modyfikowanym [Cardone i inni, 2015]. Nie mniej jednak trzeba podkreślić, iż na właściwości reologiczne mastyksu, oprócz lepkości zastosowanego lepiszcza bazowego, ma wpływ również struktura użytego wypełniacza mineralnego. Prof. J. Piłat wykazał, iż należy zwrócić szczególną uwagę na wybór stosowanego wypełniacza, gdyż ma to wpływ na zmiany podatności mastyksu w wyniku zmiennych warunków klimatycznych oraz obciążeniowych [Piłat, 1994]. Analizując składy najczęściej stosowanych MMA w naszym kraju stwierdzono, że asfalt stanowi około 10-15% objętości mieszanki. Natomiast w powstałym mastyksie asfaltowym asfalt stanowi około 60-80% objętości, a wypełniacz 20-40%. Można więc zauważyć, iż oddziaływanie mastyksu na finalny produkt, jakim jest MMA, jest bardzo duże. W dzisiejszych czasach zwracając uwagę na ochronę naturalnych złóż kruszyw, ekologię oraz o dobro środowiska, należy zwrócić uwagę na możliwość wykorzystania innych wypełniaczy niż klasycznie stosowany w Polsce wypełniacz wapienny. Można w literaturze odszukać informacje o próbach wykorzystania innych wypełniaczy

tj. cement portlandzki, popioły lotne uzyskiwane ze spalania węgla kamiennego [Grabowski i Wilanowicz, 2011], pyły powstające podczas odpylania kruszywa przy produkcji MMA [Wilanowicz i inni, 2013], wapno hydratyzowane [Mazurek i inni, 2019B]. W normie PN-EN 13043 widnieje zapis, iż dopuszcza się wprowadzenie innego wypełniacza w postaci tzn. wypełniacza mieszanego, definiowanego jako wypełniacz mineralny wymieszany z wodorotlenkiem wapnia. Na podstawie literatury można zauważyć, iż mastyks silnie wpływa na parametry MMA, natomiast w PN-EN 13043 nie ma informacji na temat sposobu doboru ilości i gatunku lepiszcza w odniesieniu do właściwości mastyksów. W zapisach WT-1 są przedstawione wymagania dla wypełniaczy w zakresie uziarnienia, jakości pyłów, zawartości wody, gęstości ziaren, zawartości wolnej przestrzeni w zagęszczonym wypełniaczu, rozpuszczalności w wodzie, przyroście temperatury mięknięcia, zawartości CaCO_3 , liczbie asfaltowej oraz zawartości wodorotlenku wapnia w wypełniaczu mieszanym. Dla przykładu podano wymagania dotyczące betonu asfaltowego (AC) dla warstwy podbudowy w tab. 2.1. Warto zaznaczyć, iż WT-1 dopuszcza zastosowanie innego wypełniacza, ale musi on spełniać wymagania graniczne wcześniej przedstawionych parametrów. Najważniejszym parametrem, zgodnie WT-1, jest zawartość CaCO_3 w wypełniaczu mieszanym, który wskazuje na minimalną zawartość węglanu wapnia równą 70%. Badania wpływu wypełniaczy różnego pochodzenia (wypełniacze wapienne, bazaltowe, granitowe, pyły różnego pochodzenia czy też popioły lotne) na oddziaływanie usztywniające w MMA prowadził na Politechnice Poznańskiej prof. W. Grabowski wraz z zespołem [Wilanowicz i inni, 2012; Grabowski i inni, 2014; Wilanowicz i inni, 2013; Grabowski i inni, 2006]. Prace te przedstawiają wyniki badań cech strukturalnych i właściwości funkcjonalnych wypełniaczy różnego pochodzenia. Głównym celem badań przedstawionych opisanych w wymienionych powyżej pracach było poznanie właściwości popiołów lotnych z elektrowni opalanych węglem brunatnym oraz próby wykorzystania ich jako wypełniacza do MMA.

Tab.2.1. Wymagane właściwości wypełniacza* do podbudowy z AC [WT-1].

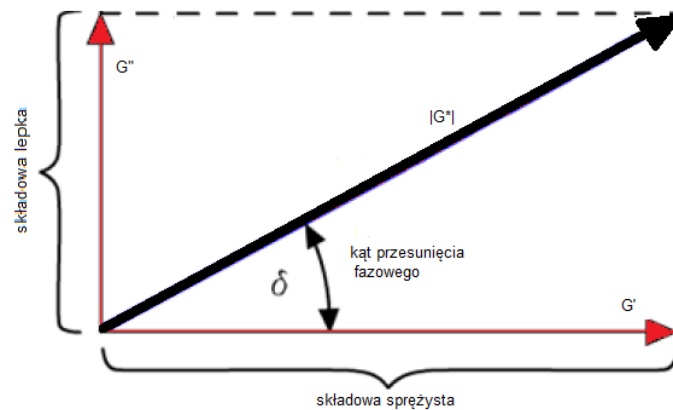
Właściwości wypełniacza	Wymagania w zależności od kategorii ruchu		
	KR1÷KR2	KR3÷KR4	KR5÷KR7
Uziarnienie według PN-EN 933-10:	zgodne z tablicą 24 w PN-EN 13043		
Jakość pyłów według PN-EN 933-9, kategoria nie wyższa niż:	MB _F 10		
Zawartość wody według PN-EN 1097-5, nie wyższa niż:	1%(m/m)		
Gęstość ziaren według EN 1097-7:	deklarowana przez producenta		
Wolne przestrzenie w suchym zagęszczonym wypełniaczu według PN-EN 1097-4, wymagana kategoria:	V _{28/45}		
Przyrost temperatury mięknięcia według PN-EN 13179-1, wymagana kategoria:	Δ _{R8B} 8/25		
Rozpuszczalność w wodzie według PN-EN 1744-1, kategoria nie wyższa niż:	WS ₁₀		
Zawartość CaCO ₃ w wypełniaczu wapiennym według PN-EN 196-2, kategoria nie niższa niż:	CC ₇₀		
Zawartość wodorotlenku wapnia w wypełniaczu mieszanym, według PN-EN 459-2, wymagana kategoria:	KaDeklarowana		
„Liczba asfaltowa” według PN-EN 13179-2, wymagana kategoria:	BN _{Deklarowana}		

^{*)} Można stosować pyły z odpylania, pod warunkiem spełnienia wymagań jak dla wypełniacza zgodnie z p. 5 PN-EN 13043. Proporcja pyłów i wypełniacza wapiennego powinna być tak dobrana, aby kategoria zawartości CaCO₃ w mieszance pyłów i wypełniacza wapiennego była nie niższa niż CC₇₀.

Przeprowadzono liczne badania tj. oznaczenie uziarnienia, powierzchni właściwej, porowatości czy też przyrostu temperatury mięknięcia wg metody „Pierścień i kula”. Popioły lotne nie spełniały wymagań normowych stawianych wypełniaczom przeznaczonym do MMA, gdyż powodowały zbyt duże oddziaływanie usztywniające (którego miarą był wskaźnik $\Delta T_{PiK} > 25^{\circ}C$) oraz posiadały dużą zawartość wolnych przestrzeni ($RV > 45\%$). Natomiast po zastosowaniu wypełniacza mieszanego powstałego w wyniku wymieszania mączki wapiennej i popiołu lotnego (w stosunku wagowym 1:1) zaobserwowano istotny, korzystny wpływ wypełniacza wapiennego na zmniejszenie przyrostu ΔT_{PiK} . Autorzy w licznych pracach przedstawiają tezę, iż jest istotny wpływ właściwości strukturalnych (głównie powierzchni właściwej oraz zawartości wolnych przestrzeni) na właściwości usztywniające mastyksu, niezależnie od pochodzenia próbek wypełniacza. Liczne publikacje przedstawiają wykorzystanie innych wypełniaczy niż wapienny, w wyniku czego otrzymano zadowalające właściwości MMA, np. zwiększeniu elastyczności w zakresie niskich temperatur [Li i inni, 2017], zwiększenie odporności na deformacje trwałe [Underwood i inni, 2015].

2.4. Modelowanie zjawisk reologicznych

Reologia opisuje odkształcenia materiałów i konstrukcji, jakie powstają pod wpływem działania sił zewnętrznych (naprężeń) z uwzględnieniem czasu ich działania. Asfalty i mastyksy są materiałami, które mogą występować w trzech stanach reologicznych: lepkim, lepkosprężystym oraz sprężystym. Stan lepki ciała opisuje się za pomocą lepkości dynamicznej, zaś stan sprężysty przy pomocy modułu sprężystości. W przypadku stanu lepkosprężystego można użyć modułu sztywności, tj. stosunku naprężeń do odkształceń w zależności od czasu i temperatury [Gaweł i inni, 2014].



Rys. 2.4 Graficzne przedstawienie dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$ [Styk i Błażejewski, 2004]

W związku z tym materiały badane w niniejszej rozprawie doktorskiej w stanie lepkosprężystym można opisywać jako moduł liczby zespolonej (rys. 2.4), gdzie część rzeczywista opisuje właściwości sprężyste, zaś urojona lepkie [Styk i Błażejewski, 2004].

$$|E^*| = \sqrt{E'^2 + E''^2} \quad (2.1)$$

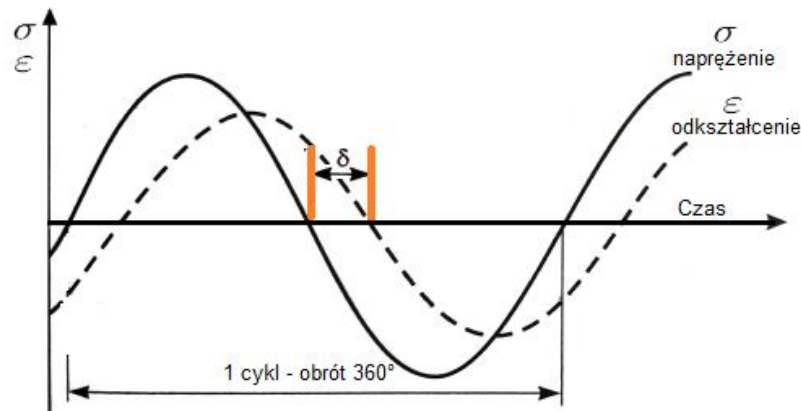
gdzie:

E^* – zespolony moduł sztywności, Pa

E' – część rzeczywista E^* , tzw. moduł zachowawczy, informujący o zdolności do gromadzenia energii),

E'' – część urojona E^* , tzw. moduł stratności, informujący o zdolności do rozpraszania energii w wyniku tarcia wewnętrznego).

Oznaczając parametry reologiczne w reometrze dynamicznego ścinania, asfalty czy też mastyksy poddaje się badaniu pod obciążeniem dynamicznym, sinusoidalnym. W materiałach lepkosprężytych występuje przesunięcie w fazie (kąąt przesunięcia fazowego δ) - opóźnienie pomiędzy wywołanym naprężeniem a powstałym odkształceniem, co przedstawiono na rys.2.5.



Rys. 2.5. Wykres zależności naprężenia oraz odkształcenia od czasu przy zastosowaniu obciążenia sinusoidalnego (opracowano na podstawie [Gaweł i inni, 2014])

Można wskazać trzy charakterystyczne przypadki dotyczące wartości kąta przesunięcia fazowego [Gaweł i inni, 2014]:

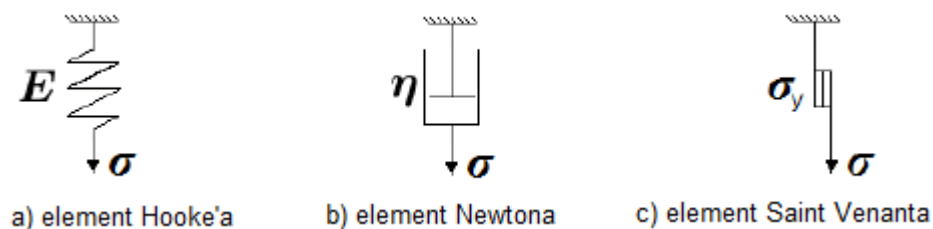
- a) $\delta = 0^\circ$, wskazuje na materiał idealnie sprężysty, wówczas nie występuje przesunięcie w fazie (ciało Hooke'a),
- b) $\delta = 90^\circ$ charakteryzuje ciało idealnie lepkie (ciecz Newtona),
- c) $0^\circ < \delta < 90^\circ$, wówczas informuje o materiale lepkosprężystym, czyli możemy zaobserwować opóźnienie w fazie powstałego odkształcenia na skutek występującego naprężenia.

Ciało reologicznie proste jest to materiał, do którego opisu matematycznego wystarczający jest jeden parametr (sprężystość, lepkość lub plastyczność),

natomiast jeżeli potrzebujemy więcej parametrów wówczas mówimy o ciele reologicznie złożonym. Asfalt jako materiał lepkosprężysty, jest ciałem reologicznie złożonym, ponieważ możemy mu przypisać zarówno cechy lepkie, jak i sprężyste [Gaweł i inni, 2014].

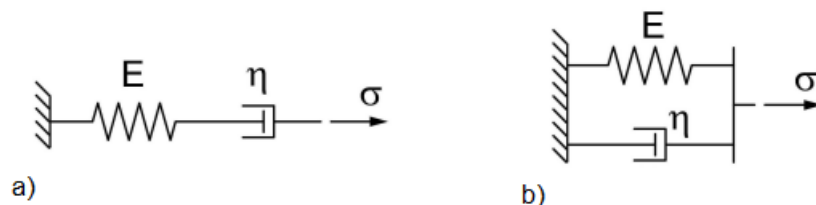
Opisując ciało reologicznie złożone wykorzystuje się proste ciała doskonałe (przedstawione graficznie na rys. 2.6) [Gaweł i inni, 2014]:

- ciało Hooke'a (ciało doskonale sprężyste) charakteryzuje liniową zależnością pomiędzy naprężeniem a odkształceniem; w modelu mechanicznym wyrażone jako sprężyna o module sprężystości E
- ciecz lepka Newtona (ciało idealnie lepkie), w którym prędkość odkształcenia jest liniową funkcją naprężenia; w modelu mechanicznym opisywana jako tłumik hydrauliczny wypełniony cieczą o lepkości η
- ciało plastyczne Saint Venanta, opisane modelem mechanicznym stanowi suwak o granicy plastyczności σ_y .

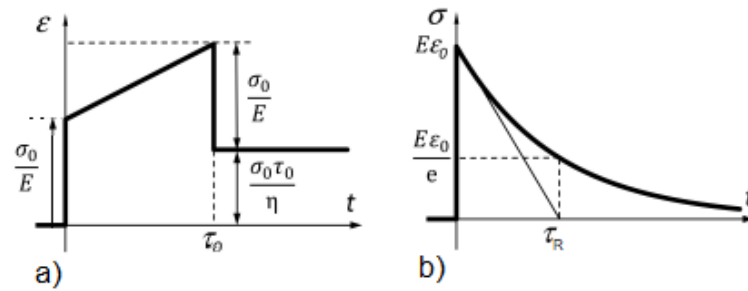


Rys. 2.6. Modele mechaniczne ciał reologicznie prostych [Gaweł i inni, 2014]

Opisując materiały lepkosprężyste łączy się ciała reologicznie proste w sposób szeregowy (model Maxwella) lub równoległy (model Kelvina, w literaturze nazywany również modelem Kelvina-Voigta), rys. 2.7.



Rys. 2.7. Schematy mechaniczne modeli dwuparametrowych: a) Maxwella, b) Kelvina [Słowik, 2013]



Rys. 2.8. Model Maxwella w próbie doświadczalnej: a) pełzania z odciążeniem, b)relaksacji [Słowik, 2013]

Model Maxwella jest szeregowym połączeniem materiału idealnie sprężystego (sprężyna) oraz modelu idealnie lepkiego (tłumik), który opisuje w ten sposób zachowanie ciała, gdzie występuje płynięcie po przyłożeniu obciążenia, natomiast odkształcenie to suma odkształceń występujących w tłumiku i sprężynie. Połączenie to idealnie odwzorowuje zachowanie materiału, w którym występuje zjawisko relaksacji naprężeń (rys. 2.8. b), zgodnie ze wzorem 2.2 [Słowik, 2013]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E \cdot \exp\left(-\frac{E}{\eta} t\right) \quad (2.2)$$

gdzie:

$\sigma(t)$ – naprężenie w chwili t , Pa

E – moduł sprężystości, Pa

ε_0 – odkształcenie, -

τ_R – czas relaksacji, $\tau_R = \frac{\eta}{E}$, s

t – czas, s

η – lepkość, Pa·s

Za pomocą modelu Maxwella można opisać relaksację zupełną, ponieważ dla czasu $t \rightarrow \infty$ naprężenia dążą asymptotycznie do zera. Można również wykonać opis nawrotu sprężystego oraz odkształcenia trwałego w materiale (rys. 2.8.a).

Model Kelvina jest zbudowany poprzez połączenie równoległe ciała Hooke'a oraz ciała Newtona (sprężyny i tłumika hydraulicznego). Model ten jest

wykorzystywany do opisu zjawiska pełzania oraz nawrotu. Odkształcenie w próbie pełzania można opisać zgodnie ze wzorem 2.3 [Słowik, 2013; Bodnar i inni, 2006]]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right) \right] \quad (2.3)$$

gdzie:

$\varepsilon(t)$ – odkształcenie w czasie t ,

σ_0 – naprężenie, Pa

E – moduł sprężystości, Pa

η – lepkość, Pa·s

t – czas, s

W przypadku, gdy $t \rightarrow \infty$ odkształcenie (wzór nr 2.3) dąży asymptotycznie do wartości $\frac{\sigma_0}{E}$, więc równanie to opisuje pełzanie ograniczone. Natomiast odkształcenie podczas nawrotu (pełzanie odwrotne po odciążeniu) opisuje równanie 2.4 [Słowik, 2013; Bodnar i inni, 2006]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right) \right] \quad \text{dla } t < \tau_0 \quad (2.4)$$

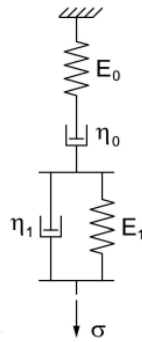
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left[\exp\left(-\frac{E}{\eta} \cdot t\right) \right] \left[\exp\left(\frac{E}{\eta} \cdot \tau_0\right) - 1 \right] \quad \text{dla } t \geq \tau_0$$

W przypadku relaksacji dla czasu $t \rightarrow \infty$ odkształcenie dąży asymptotycznie do zera $\varepsilon \rightarrow 0$, co oznacza idealny nawrót niesprężysty [Mazurek, 2019A].

Model Kelvina oraz model Maxwella połączone szeregowo tworzą model Burgersa (rys. 2.9), gdzie odkształcenie całkowite jest sumą odkształceń w każdym z elementów modelu: ciała Hooke'a, Newtona oraz Kelvina, tj.

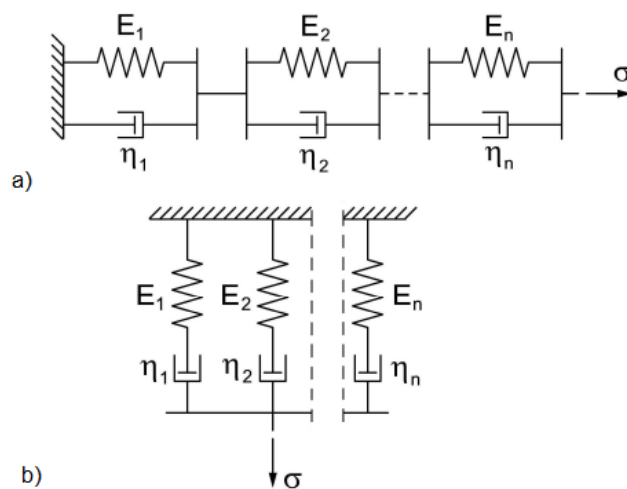
$\varepsilon_{\text{całkowite}} = \varepsilon_H + \varepsilon_N + \varepsilon_K$ obliczany zgodnie ze wzorem 2.5 [Słowik, 2013]:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{\eta_0} \cdot t + \frac{\sigma_0}{E_1} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{E_1}{\eta_1} \cdot t\right) \right) & \text{dla } t \leq \tau_0 \\ \frac{\sigma_0}{\eta_0} \cdot \tau_0 + \frac{\sigma_0}{E_1} \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{E_1}{\eta_1} \cdot t\right) \right] & \text{dla } t > \tau_0 \end{cases} \quad (2.5)$$



Rys. 2.9. Schemat mechaniczny modelu Burgersa [Słowik, 2013]

Powstaje w ten sposób czteroparametrowy model, który dobrze opisuje właściwości lepkosprężyste wykazujące natychmiastowe odkształcenie sprężyste w wyniku płynięcia i sprężystości opóźnionej. W próbie obciążenia model Burgersa opisuje natychmiastowe odkształcenie sprężyste (gdy czas dąży do zera) oraz opóźniony przyrost odkształceń (dla $t > 0$). W wyniku odciążenia w modelu Burgersa można opisać zjawiska nawrotu sprężystego oraz pełzania odwrotnego [Liu i You 2008; Mazurek, 2019A; Słowik, 2013].



Rys. 2.10. Modele uogólnione a) Kelvina oraz b) Maxwella

Podstawowe modele Kelvina oraz Maxwella są wykorzystywane do podstawowych analiz, natomiast do opisu ciał lepkosprężystych, tj. mastyks bądź lepiszcze asfaltowe, najlepiej zastosować modele uogólnione. Poprzez zwiększenie liczby elementów Kelvina (w układzie szeregowym) albo Maxwella (w układzie równoległym) tworzy się wieloparametrowe modele mechaniczne, rys. 2.10. Tego typu modele charakteryzują się kilkoma czasami relaksacji lub

retardacji. Łącząc szeregowo elementy Kelvina naprężenie ma identyczną wartość w każdym z nich, natomiast odkształcenie to suma odkształceń z każdego z elementów. Elementy połączone w sposób szeregowy częściej są wykorzystywane do opisywania zmian odkształcenia w czasie niż układy równoległe. Zjawisko pełzania i nawrotu można opisać za pomocą uogólnionego modelu Kelvina, opisując odkształcenia za pomocą wzoru 2.6 [Słowik, 2013]:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \sigma_0 \cdot \left\{ \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta_0} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_i}{\eta_i} t\right) \right] \right\} & \text{dla } t \leq \tau_0 \\ \sigma_0 \cdot \left\{ \frac{\tau_0}{\eta_0} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \exp\left(-\frac{E_i}{\eta_i} t\right) \left[1 - \exp\left(\frac{E_i}{\eta_i} \tau_0\right) \right] \right\} & \text{dla } t > \tau_0 \end{cases} \quad (2.6)$$

gdzie:

$\varepsilon(t)$ – odkształcenie w chwili t ,

σ_0 – naprężenie, Pa

E_i – moduł sprężystości i -tego elementu Hooke'a,

τ_R – czas retardacji dla i -tego elementu, $\frac{\eta_i}{E_i}$, s

τ_0 – czas w momencie, gdy nastąpiło odciążenie

W próbie relaksacji, wywołując naprężenia przy stałej wartości odkształcenia ε_0 całkowite naprężenie w modelu uogólnionym Maxwella (składającym się z n -elementów) w chwili t można opisać za pomocą wzoru 2.7 [Słowik, 2013]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{E_i}{\eta_i} t\right) \quad (2.7)$$

gdzie:

$\sigma(t)$ – naprężenie w czasie t ,

ε_0 – wartość odkształcenia,

E_i – moduł sprężystości i -tego elementu Maxwella,

τ_{Ri} – czas relaksacji, wyrażony jako η_i/E_i

Zaletą modeli uogólnionych jest fakt, że opis matematyczny krzywych pełzania czy też relaksacji naprężeń może być o wiele dokładniejszy niż przy wykorzystaniu modeli dwu czy cztero parametrowych.

3. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY

Mieszanki mineralno-asfaltowe mają bardzo szerokie zastosowanie w budownictwie drogowym w górnych warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej. Składają się głównie z odpowiednio dobranego kruszywa, lepiszcza asfaltowego oraz wypełniacza mineralnego. Połączenie fizyczne drobnego kruszywa (o frakcji $< 0,125$ mm) tj. wypełniacza mineralnego oraz asfaltu podczas produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, tworzy lepiszcze o zmienionych właściwościach reologicznych, zwane mastyksem asfaltowym, bądź zaczynem asfaltowym.

Wzajemne oddziaływanie pomiędzy zastosowanym wypełniaczem mineralnym a lepiszczem asfaltowym ma ogromny wpływ na późniejsze zachowanie się MMA w warstwach nawierzchni asfaltowych, m.in. na usztywniające działanie mastyksu asfaltowego, odporność na działanie wody czy też chłonność asfaltu. W związku z powyższym zaistniała potrzeba badań właściwości reologicznych mastyksów asfaltowych sporządzonych z udziałem asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS oraz oceny ich wpływu na właściwości MMA. Mastyksy otrzymano z asfaltów ponaftowych modyfikowanych kopolimerem SBS (asfalt wyjściowy 50/70 oraz asfalty modyfikowane zawierające 3%, 5%, 7% oraz 9% kopolimeru SBS) oraz różnego pochodzenia wypełniaczy mineralnych: wapiennego, bazaltowego oraz granodiorytowego. Zachowanie się wypełniaczy mineralnych oraz lepiszczy asfaltowych w MMA nie jest łatwe do przewidzenia ze względu na bardzo złożony charakter interakcji pomiędzy tymi dwoma materiałami.

Na podstawie przeglądu literatury oraz własnych obserwacji podczas prowadzenia badań pilotażowych postawiono następujące tezy:

- a) Istnieje korelacja pomiędzy właściwościami strukturalnymi zastosowanego wypełniacza a uzyskanymi właściwościami reologicznymi mastyksów asfaltowych.
- b) Modyfikacja asfaltu kopolimerem SBS znacznie obniża efekt usztywnienia mastyksu asfaltowego sporządzonego z jego udziałem.

Celem rozprawy doktorskiej jest:

- ocena wpływu procesu starzenia technologicznego lepiszczy asfaltowych symulowanego metodą laboratoryjną na zmiany właściwości mastyksów asfaltowych,
- ocena wpływu rodzaju i cech lepiszczy asfaltowych oraz wypełniaczy mineralnych na właściwości reologiczne mastyksów asfaltowych,
- ocena właściwości reologicznych badanych mastyksów asfaltowych w szerokim zakresie temperatur na podstawie rezultatów badań wykonanych z zastosowaniem reometru dynamicznego ścinania (DSR) oraz duktylometru,
- wykonanie opisu matematycznego zjawiska relaksacji z użyciem modeli reologicznych oraz porównanie rezultatów uzyskanych w efekcie modelowania z wynikami eksperymentu.

Zakres niniejszej rozprawy doktorskiej obejmuje 7 rozdziałów:

Rozdział 1 oraz rozdział 2 zawierają wprowadzenie do omawianej problematyki badawczej na podstawie studium literatury dotyczącej modyfikacji asfaltów drogowych polimerami, wpływu wypełniacza na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej, charakterystyk strukturalnych i funkcjonalnych wypełniaczy mineralnych stosowanych w warstwach konstrukcji nawierzchni.

Rozdział 3 obejmuje tezy, zakres i cel rozprawy.

W rozdziale 4 scharakteryzowano badane lepiszcza, wypełniacze oraz mastyksy asfaltowe oraz sposób przygotowania próbek do badań.

Rozdział 5 zawiera szczegółowy opis wykonanych badań laboratoryjnych wypełniaczy, asfaltów oraz mastyksów.

Rozdział 6 przedstawia wyniki badań wypełniaczy mineralnych, wyniki badań lepiszczy asfaltowych oraz mastyksów oraz ich analizę.

W rozdziale 7 sformułowano wnioski końcowe na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych oraz przeprowadzonych prac obliczeniowych.

4. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW

4.1. Asfalty modyfikowane elastomerem SBS

- **Charakterystyka badanych asfaltów modyfikowanych elastomerem SBS**

Program badań zrealizowanych w niniejszej rozprawie doktorskiej obejmował badania asfaltów modyfikowanych elastomerem SBS oraz mastyksów asfaltowych. Analizując rynek krajowy pod kątem asfaltów modyfikowanych polimerami, stosowanych modyfikatorów, ich rodzaju, zawartości w asfalcie czy też pochodzenie asfaltu wyjściowego, zwrócono szczególną uwagę na asfalty najczęściej wykorzystywane do budowy dróg w Polsce, czyli lepszczka modyfikowane elastomerem SBS. Informacje na temat składu lepszczki modyfikowanych, a zwłaszcza rodzaju czy też zawartości zastosowanych polimerów, często są tajemnicą handlową producentów asfaltów. Chcąc analizować wpływ zawartości elastomeru SBS na właściwości reologiczne asfaltu, podjęto się modyfikacji asfaltu w laboratorium, wykorzystując w tym celu koncentrat asfaltu modyfikowanego kopolimerem blokowym SBS Kraton (nazwa rynkowa D-1100CM), o znanej zawartości kopolimeru równej $(9,0 \pm 0,2)\%$. Kraton D-1100CM jest to kopolimer blokowy o strukturze liniowej. Deklarowane właściwości koncentratu to: gęstość 940 kg/m^3 , wydłużenie przy zerwaniu 880%, wytrzymałość na rozciąganie 33 MPa, moduł sprężystości przy odkształceniu równym 300%: 2,9 MPa. W badaniach wykorzystano asfalt drogowy 50/70 wyprodukowany z rosyjskiej ropy naftowej. Asfalt ten modyfikowano poprzez mieszanie w odpowiednich proporcjach (komponowanie) z asfaltem o znanej zawartości masowej kopolimeru blokowego o strukturze liniowej SBS, o zawartości kopolimeru równej 9%. Uzyskano w ten sposób asfalty modyfikowane o znanej zawartości kopolimeru SBS.

- **Opis procedury przygotowania próbek asfaltów modyfikowanych**

Asfalt 50/70 łączono poprzez komponowanie w odpowiednich proporcjach z koncentratem asfaltu modyfikowanego kopolimerem, o zawartości elastomeru równej 9% SBS.

Przygotowanie próbek kompozytów asfaltów modyfikowanych składało się z trzech zasadniczych etapów:

- a) rozgrzania materiałów wyjściowych; do temperatury 155°C dla próbki asfaltu 50/70 oraz 190°C dla próbki 9% koncentratu kopolimeru SBS (tab. 4.1.)
- b) odważenia odpowiedniej ilości składników wyjściowych, na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,01 g; w metalowych pojemnikach o pojemności 500 g, asfalt 50/70 oraz koncentrat o zawartości 9% kopolimeru SBS łączono w trzech proporcjach 2:1, 4:5 oraz 2:7, otrzymując w ten sposób asfalty modyfikowane o zawartości elastomeru SBS równej odpowiednio 3%, 5% oraz 7% (w stosunku do masy otrzymanego asfaltu modyfikowanego)
- c) wymieszania opisanych uprzednio rozgrzanych składników, z zastosowaniem homogenizatora laboratoryjnego (rys. 4.1) o prędkości kątowej równej 400 obr./min, uzyskując w ten sposób jednorodny kompozyt asfaltowo-polimerowy (czas mieszania 5 minut).



Rys. 4.1. Homogenizator laboratoryjny o prędkości kątowej 400 obr./min podczas mieszania próbki asfaltu modyfikowanego polimerem

W tablicy 4.1 przedstawiono lepiscza asfaltowe zastosowane w programie badawczym, łącznie z informacją o zawartości kopolimeru SBS w poszczególnych asfaltach modyfikowanych. W drugiej kolumnie przedstawiono symboliczne oznaczenia badanych lepisczy asfaltowych, stosowane w dalszej części dysertacji. W ostatniej kolumnie zaprezentowano

wartości temperatur rozgrzewania zastosowane podczas przygotowywania próbek do badań.

Tablica.4.1. Zestawienie badanych lepiszczy asfaltowych

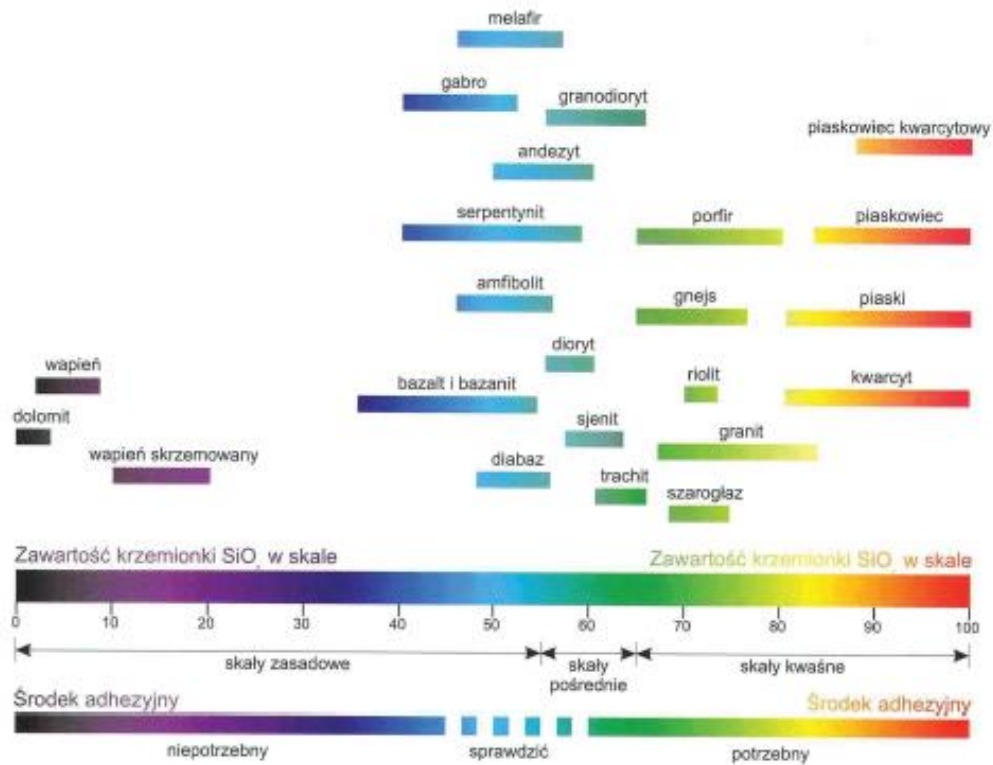
L.p.	Symboliczne oznaczenie	Zawartość procentowa masy materiałów wyjściowych, %		Zawartość elastomeru SBS, %	Temp. Rozgrzewania, °C
		Asfalt 50/70	Koncentrat 9%SBS		
1	50/70	100	0	0,0	155
2	3%SBS	66,6	33,4	3,0	160
3	5%SBS	44,4	55,6	5,0	165
4	7%SBS	22,2	77,8	7,0	175
5	9%SBS	0	100	9,0	190

W celu oceny wpływu procesów starzenia na właściwości asfaltów modyfikowanych oraz mastyksów wykorzystano metodę symulującą starzenie krótkookresowe RTFOT (skrót od ang. Rolling Thin Film Oven Test), zgodnie z normą PN-EN 12607-1. Szczegółowy opis symulacji procesu starzenia metodą RTFOT asfaltów oraz mastyksów zamieszczono w dalszej części pracy (rozdział 5.2).

4.2. Wypełniacze mineralne

- **Charakterystyka badanych wypełniaczy mineralnych**

Zgodnie z [WT-1] wypełniacz jest to kruszywo, którego większa część (min. 70%) przechodzi przez sito 0,063 mm. Wszystkie stosowane kruszywa w budownictwie drogowym można podzielić ze względu na zawartość krzemionki (SiO_2), co przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Podział kruszyw ze względu na zawartość SiO₂ [Błażejowski i Styk, 2000]

Wybór wypełniaczy do badań nie był przypadkowy, głównie kierowano się różnorodnością pod względem kwasowości zastosowanych kruszyw [Bilski i inni, 2020]. W związku z tym wybrano trzy kruszywa, różniące się zawartością SiO₂.

Pierwszy tradycyjnie stosowany w budownictwie drogowym wypełniacz wapienny, uzyskiwany poprzez zmielenie do wymaganego uziarnienia kamienia wapiennego (skały osadowe o zawartości węgla wapnia-kalcytu CaCO₃ powyżej 90%). Grube kruszywo wapienne rzadko używane jest budownictwie drogowym do produkcji MMA, ze względu na małą odporność na ścieranie. Wapień charakteryzuje się niską, znikomą kwasowością (zawartość SiO₂ do 5%), natomiast charakteryzuje się dobrą przyczepnością lepiscza do kruszywa.

Drugim zastosowanym wypełniaczem był wypełniacz bazaltowy, który należy do skał zasadowych i jest pozyskiwany m.in. w procesie odpylania kruszywa bazaltowego w wytwórni MMA. Charakteryzuje się zawartością SiO₂ w przedziale 45-52% [Ryka i Maliszewska, 1991]. Bazalt jest skałą magmową, wylewną (wulkaniczną). Najczęściej stosowane kruszywo w budownictwie drogowym w Polsce.

Trzecim zastosowanym wypełniaczem był wypełniacz granodiorytowy, należący do skał kwaśnych (zawartość $\text{SiO}_2 > 70\%$). Jest to skała magmowa, głębinowa (plutoniczna); wywodząca się z rodziny skał nazywanych granitoidami.

• **Opis procedury przygotowania próbek wypełniaczy mineralnych**

Do badań i analiz wybrano materiały różniące się zawartością krzemionki, które reprezentują wypełniacze stosowane podczas produkcji MMA w kraju. Zastosowane wypełniacze do badań pobrano z próbki ogólnej, uzyskując w ten sposób około 5 kg wypełniacza. Wszystkie próbki laboratoryjne badanych wypełniaczy wysuszono do stałej masy w temperaturze $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, po czym ochłodzono w eksykatorze do temperatury pokojowej. Następnie próbki przesiano przez sito o boku oczka kwadratowego 0,125 mm. Badania wykonywano na wypełniaczu o frakcji $\leq 0,125$ mm, zarówno cech strukturalnych wypełniacza, jak i właściwości reologicznych mastyksów asfaltowych.

4.3. Mastyksy asfaltowe

• **Opis procedury przygotowania próbek mastyksów asfaltowych**

Mastyksy będące przedmiotem badań i analiz przygotowywano zgodnie z następującą procedurą:

- a) Badane wypełniacze (przesiane przez sito o boku oczka 0,125 mm) wysuszono w suszarce laboratoryjnej w temperaturze $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, aż do uzyskania stałej masy,
- b) Lepiszczą asfaltową podgrzano do temperatury wskazanej w tab. 4.1,
- c) Odważono odpowiednie ilości wypełniacza oraz asfaltu na wadze laboratoryjnej o dokładności 0,01 g; w taki sposób, aby uzyskać stosunek objętościowy wypełniacza do asfaltu $W/A=0,60$;
- d) Wymieszanie rozgrzanych składników (asfaltu i wypełniacza) za pomocą mieszadła laboratoryjnego o prędkości obrotowej równej 400 obr./min., pojemnik z przygotowanym mastyksem podczas procesu mieszania był

termostatowany poprzez okrycie materiałem termoizolacyjnym, temperatura była utrzymywana na stałym poziomie przez okres mieszania, tj. czas 15 min.

Zestawienie badanych lepiszczy oraz mastyksów asfaltowych przedstawiono w tab. 4.2., gdzie wyjaśniono użyte w niniejszej rozprawie doktorskiej symboliczne skróty badanych materiałów oraz używane temperatury rozgrzewania.

Tablica.4.2. Zestawienie badanych lepiszczy i mastyksów asfaltowych wraz z temperaturą rozgrzewania badanych materiałów

L.p.	Symboliczne oznaczenie	Opis badanego materiału	Temperatura rozgrzewania, °C
1	50/70	Asfalt 50/70	155
2	50/70 RTFOT	Asfalt 50/70 po starzeniu metodą RTFOT	155
3	50/70+WW	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 50/70 i wypełniacza wapiennego	160
4	50/70 RTFOT+WW	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 50/70 po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza wapiennego	160
5	50/70+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 50/70 i wypełniacza bazaltowego	160
6	50/70 RTFOT+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 50/70 po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza bazaltowego	160
7	50/70+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 50/70 i wypełniacza granodiorytowego	160
8	50/70 RTFOT+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 50/70 po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza granodiorytowego	160
9	3%SBS	Asfalt zawierający 3% kopolimeru SBS	160
10	3%SBS RTFOT	Asfalt 3%SBS po starzeniu metodą RTFOT	160
11	3%SBS+W W	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 3%SBS i wypełniacza wapiennego	165
12	3%SBS RTFOT+WW	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 3%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza wapiennego	165
13	3%SBS+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 3%SBS i wypełniacza bazaltowego	165
14	3%SBS RTFOT+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 3%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza bazaltowego	165
15	3%SBS +WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 3%SBS i wypełniacza granodiorytowego	165

16	3%SBS RTFOT+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 3%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza granodiorytowego	165
17	5%SBS	Asfalt zawierający 5% kopolimeru SBS	165
18	5%SBS RTFOT	Asfalt 5%SBS po starzeniu metodą RTFOT	165
19	5%SBS+W W	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 5%SBS i wypełniacza wapiennego	170
20	5%SBS RTFOT+WW	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 5%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza wapiennego	170
21	5%SBS+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 5%SBS i wypełniacza bazaltowego	170
22	5%SBS RTFOT+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 5%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza bazaltowego	170
23	5%SBS+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 5%SBS i wypełniacza granodiorytowego	170
24	5%SBS RTFOT+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 5%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza granodiorytowego	170
25	7%SBS	Asfalt zawierający 7% kopolimeru SBS	170
26	7%SBS RTFOT	Asfalt 7%SBS po starzeniu metodą RTFOT	170
27	7%SBS+W W	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 7%SBS i wypełniacza wapiennego	180
28	7%SBS RTFOT+WW	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 7%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza wapiennego	180
29	7%SBS+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 7%SBS i wypełniacza bazaltowego	180
30	7%SBS RTFOT+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 7%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza bazaltowego	180
31	7%SBS+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 7%SBS i wypełniacza granodiorytowego	180
32	7%SBS RTFOT+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 7%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza granodiorytowego	180
33	9%SBS	Asfalt zawierający 9% kopolimeru SBS	190
34	9%SBS RTFOT	Asfalt 9%SBS po starzeniu metodą RTFOT	190
35	9%SBS+W W	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 9%SBS i wypełniacza wapiennego	190
36	9%SBS RTFOT+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 9%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza wapiennego	190
37	9%SBS+W W	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 9%SBS i wypełniacza bazaltowego	190
38	9%SBS RTFOT+WB	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 9%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza bazaltowego	190

39	9%SBS+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 9%SBS i wypełniacza granodiorytowego	190
40	9%SBS RTFOT+WG	Mastyks asfaltowy sporządzony z asfaltu 9%SBS po starzeniu metodą RTFOT i wypełniacza granodiorytowego	190

Wartości temperatury rozgrzewania badanych materiałów, zarówno lepiszczy jak i mastyksów asfaltowych, były określone na podstawie wstępnych badań temperatury mięknięcia T_{PIK} , zwiększając ją o wartość $(75 \div 85)^{\circ}\text{C}$.

W trakcie procesu starzenia symulowanego metodą laboratoryjną RTFOT mastyksów następuje osadzanie się na dnie szklanej butelki wypełniacza mineralnego, co za tym idzie rozsegregowanie mastyksu asfaltowego. W konsekwencji uniemożliwia to pozyskanie jednorodnego materiału po badaniu RTFOT. Z tego względu zdecydowano się na dodanie wypełniacza mineralnego w późniejszym etapie, do lepiszczy asfaltowych po starzeniu metodą RTFOT, bez konieczności modyfikacji procesu starzenia w warunkach laboratoryjnych. W niniejszej rozprawie doktorskiej asfalty po procesie starzenia mają dodany w nazwie skrót RTFOT.

5. METODYKA BADAŃ WYPEŁNIACZY, LEPISZCZY I MASTYKSÓW ASFALTOWYCH

5.1. Właściwości strukturalne wypełniaczy mineralnych

- **Uziarnienie wypełniacza**

Uziarnienie wypełniacza oznaczono metodą przesiewania w strumieniu powietrza wg PN-EN 933-10. Zgodnie z normą metoda przesiewania wypełniacza w strumieniu powietrza stosowana jest do oznaczania wagowego rozkładu wielkości ziaren, stosuje się ją do badań wypełniaczy o wymiarze ziaren do 2 mm. Badanie przeprowadza się na aparacie do przesiewania w strumieniu powietrza (rys. 5.1), stosując różnicę ciśnienia ($3,0 \pm 0,5$) kPa w przekroju sita. Wykorzystując zestaw sit o średnicy 200 mm oraz wymiarze otworów kwadratowych 0,063 mm, 0,125 mm oraz 2,0 mm. Wysuszoną próbkę analityczną o masie ($50,0 \pm 1,0$) g należy umieścić na pierwszym z sit (0,063 mm). Następnie należy przykryć sito pokrywą i uruchomić aparat do przesiewania w strumieniu powietrza. Przesiewanie należy kontynuować aż do osiągnięcia całkowitego przesiewu, co najmniej 3 min. Proces przesiewania uważa się za zakończony, gdy masa materiału pozostałego na sicie nie zmienia się o więcej niż 0,1% masy próbki analitycznej w ciągu jednej minuty.



Rys. 5.1. Aparat do przesiewania wypełniacza w strumieniu powietrza

Pozostałość na sicie należy zważyć z dokładnością do 0,1 g. Procedurę należy powtórzyć z sitem 0,125 mm, a następnie 2 mm. Za każdym razem wykorzystując materiał pozostający (odsiew) na poprzednim sicie (o mniejszym wymiarze oczek). Wynik należy przedstawić jako procent materiału przechodzącego przez każde z sit w stosunku do masy początkowej próbki analitycznej.

- **Powierzchnia właściwa wg PN-EN 196-6 (wg metody Blaine'a).**

Powierzchnię właściwą oznaczono wykorzystując metodę Blaine'a, polegającą na pomiarze czasu niezbędnego do przepływu powietrza przez sprasowaną warstwę wypełniacza, przy znanej porowatości oraz gęstości badanego materiału. Wysuszoną oraz pozbawioną zbryleń próbkę analityczną odważa się na wadze laboratoryjnej z dokładnością 0,01 g, a jej masę wyznaczyć zgodnie ze wzorem:

$$m = 0,500 \cdot \rho \cdot V \quad (5.1)$$

gdzie:

m – masa próbki, g

ρ – gęstość wypełniacza, g/cm³

V – objętość warstwy wypełniacza, cm³



Rys. 5.2. Aparat Blaine'a

Następnie odważoną ilość wypełniacza (wzór 5.1) umieszcza się w tłoku i zagęszcza poprzez dociśnięcie tłokiem. Umieścić tłok z badaną próbką w górnej części manometru, doprowadzić ciecz wewnątrz manometru do najwyższej kreski, zamknąć kran odcinający, usunąć korek zabezpieczający z tulei. Następnie należy dokładnie zmierzyć czas, gdy ciecz znajduje się pomiędzy drugą i trzecią kreską. Badanie powtórzono czterokrotnie, odnotowując temperaturę otoczenia oraz czas przepływu powietrza.

Powierzchnię właściwą wyznaczono zgodnie z normą PN-EN 196-6, wg wzoru:

$$S = \frac{K \sqrt{e^3}}{\rho (1 - e)} \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1 \eta_0}} \quad (5.2)$$

gdzie:

S – powierzchnia właściwa, cm^2/g

K – stała aparatu Blaine'a = 2,589

e – zawartość wolnej przestrzeni w wypełniaczu, %

ρ – gęstość wypełniacza, g/cm^3

η_0 – lepkość powietrza przy danej temperaturze, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

t – czas przepływu, $^\circ\text{C}$

- **Zawartość wolnych przestrzeni wg PN-EN 1097-4 (wg metody Rigden'a).**

Zgodnie z normą PN-EN 1097-4 oznaczono zawartość pustych przestrzeni suchego, zagęszczonego wypełniacza za pomocą aparatu Rigdena (rys. 5.3). W dalszej części pracy używano nazwy „zawartości wolnych przestrzeni”. Badanie polega na tym, że wysuszoną próbkę analityczną należy przesiać przez sito 0,125 mm. Następnie należy zważyć blok z bibułką bez tłoka, w dalszej kolejności umieścić tłok i odczytać pozycję zerową wysokości. Następnie umieszcza się (10 ± 1) g wypełniacza w cylindrze bloku spadowego, należy położyć bibułkę filtracyjną na powierzchni wypełniacza i wstępnie zagęścić delikatnie wypełniacz tłokiem. Następnie blok spadowy przemieszcza się do górnego ogranicznika aparatu

i opuszcza swobodnie na podstawę. Czynność tą należy powtórzyć 100 razy w odstępach co 1 s. Po procesie zagęszczania odczytuje się wysokość zagęszczonego wypełniacza oraz po usunięciu tłoka, waży cylinder z wypełniaczem i bibułą filtracyjną. Oznaczenie powtórzono trzykrotnie, aparat Rigdena przedstawiono na rys. 5.3.

Objętość wolnych przestrzeni w wypełniaczu obliczono zgodnie ze wzorem 5.3 wg normy PN-EN 1097-4:

$$V = \left(1 - \frac{4 \cdot 10^3 \cdot m_2}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \rho_1 \cdot h} \right) \cdot 100 \quad (5.3)$$

V – objętość wolnych przestrzeni, %

m_2 – masa zagęszczonego wypełniacza, g

α – wewnętrzna średnica cylindra bloku spadowego, mm

ρ_1 – gęstość ziaren wypełniacza, Mg/m³

h – wysokość zagęszczonego wypełniacza, mm



Rys. 5.3. Aparat Rigdena

- **Wskaźnik błękitu metylenowego wg PN-EN 933-9.**

Zawartość części ilastych oznaczono za pomocą wskaźnika błękitu metylenowego zgodnie z normą PN-EN 933-9; załącznikiem A odnośnie kruszyw o frakcji poniżej 125 μm . Minerale ilaste powstają w wyniku wietrzenia glinokrzemianów, większość z nich posiada strukturę wewnętrzną warstwową. Ich cechą charakterystyczną jest zdolność do adsorpcji wody. Cząsteczki wypełniacza w strukturze MMA są z reguły otoczone nieprzepuszczalną błonką lepiscza asfaltowego, która powinna zabezpieczać je przed dostępem wody. Jednakże, woda bardzo często przenika przez warstwę lepiscza asfaltowego z kilku przyczyn [Raciborski, 1977]: woda ma bezpośredni kontakt z ziarnami wypełniacza w warstwach wierzchnich konstrukcji nawierzchni, zwłaszcza w wyniku uszkodzenia w sposób mechaniczny lub termiczny, albo przez błędny proces technologiczny, w wyniku którego pozostaną ziarna nieotoczone lepisczem. W związku z tym minerale ilaste mogą pochłaniać wodę, w wyniku tego zjawiska zaczynają pęcznieć, co prowadzi do odmywania lepiscza asfaltowego z powierzchni ziaren oraz destrukcji struktury MMA.

Metoda oznaczenia zawartości minerałów ilastych polega na „próbie plamy” (rys.5.4) wykonanej na bibule filtracyjnej (o gramaturze 95 g/m^2 , grubości 0,20 mm oraz średnicy porów 8 μm) z zawiesiny próbki analitycznej wypełniacza w wodzie destylowanej oraz roztworu błękitu metylenowego. Masa próbki analitycznej w przypadku kruszyw o frakcji < 0,125 mm powinna wynosić $(30,0 \pm 0,1)$ g. Procedura badania polega na tym, aby do szklanej zlewki wlać (500 ± 5) ml wody destylowanej i dodać wysuszoną próbkę analityczną, a następnie wymieszać. Roztwór barwnika błękitu metylenowego należy używać o stężeniu $(10,0 \pm 0,1)$ g/l. Następnie należy wymieszać zawartość zlewki przez okres 5 minut z prędkością kątową 600 obr./min, potem zmniejszając ilość obrotów do 400 obr./min można dodawać roztwór błękitu metylenowego, zaczynając od 5 ml. Wówczas wykonać próbę plamy na bibule filtracyjnej. Należy kontynuować dodawanie błękitu metylenowego, aż do momentu pojawienia się podczas próby plamy jasnoniebieskiej obwódki.

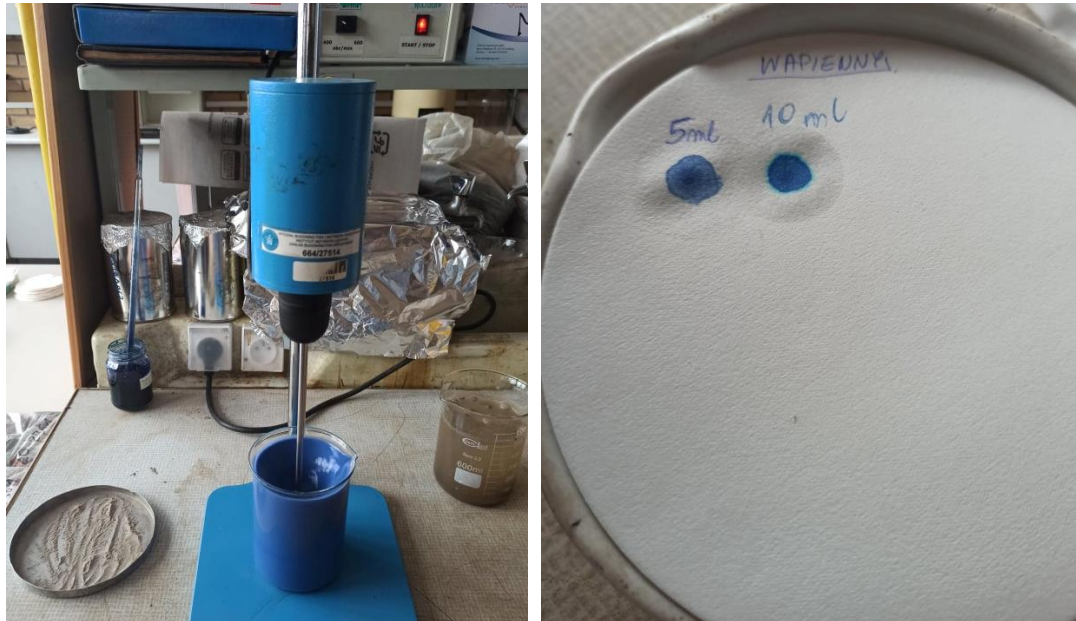
Wskaźnik błękitu metylenowego należy obliczyć zgodnie z poniższym wzorem:

$$MB_F = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10 \quad (5.4)$$

gdzie:

V_1 – całkowita objętość wprowadzonego roztworu błękitu metylenowego, ml

M_1 – masa próbki analitycznej, g



a)

b)

Rys. 5.4. Oznaczenie zawartości części ilastych a) w trakcie badania b) próba płamy dla wypełniacza wapiennego

- **Gęstość wypełniacza wg PN-EN 1097-7**

Gęstość wypełniacza oznaczono zgodnie z normą PN-EN 1097-7 metodą piknometryczną.



Rys. 5.5. Piknometry o pojemności 50ml

Oznaczenie gęstości przeprowadzono na trzech oddzielnych próbkach. Badanie rozpoczęto od zważenia suchego i czystego piknometr z korkiem, następnie wysypano (10 ± 1) g wypełniacza. W dalszym etapie umieszczono go w eksykatorze próżniowym o wartości podciśnienia $(3,0 \pm 0,3)$ kPa przez okres 30 minut. Po wyjęciu piknometr wypełniono wodą destylowaną i umieszczono w łaźni wodnej o temperaturze $25,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Po 60 minutach, osuszony piknometr zważono.

Gęstość wypełniacza wyznaczono zgodnie z poniższym wzorem:

$$\rho_w = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{H_2O}}} \quad (5.5)$$

gdzie:

ρ_w – gęstość wypełniacza w temperaturze 25°C , Mg/m^3

m_0 – masa pustego piknometr, g

m_1 – masa piknometr z próbką analityczną, g

m_2 – masa piknometr z próbką analityczną i wodą destylowaną, g

V – pojemność piknometr, ml

ρ_{H_2O} – gęstość wody destylowanej w temperaturze 25°C , Mg/m^3

Badania cech strukturalnych wypełniaczy mineralnych przeprowadzono w laboratorium drogowym Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej.

5.2. Podstawowe cechy lepiszczy i mastyksów asfaltowych

- **Penetracja**

Penetrację asfaltów oraz mastyksów oznaczono zgodnie z normą PN-EN 1426. Penetracja asfaltu jest definiowana jako miara twardości asfaltu, wyrażona poprzez głębokość na jaką zanurza się znormalizowana igła penetracyjna w próbce lepiszcza asfaltowego umieszczonego w naczyniu penetracyjnym w określonych warunkach temperatury, obciążenia i czasu działania obciążenia. Podstawowe warunki badania w których dokonuje się oznaczenia penetracji to temperatura $(25 \pm 0,1)^\circ\text{C}$, obciążenie o masie całkowitej $(100 \pm 0,1)$ g

(obciążenie stanowi suma masy igły penetracyjnej, trzpienia oraz obciążnika) oraz czas działania obciążenia ($5 \pm 0,1$) s. Przygotowując próbkę, należy rozgrzanym lepiszczem zalać naczynie penetracyjne na wysokość min. o 10 mm większą niż przewidywana penetracja asfaltu, następnie ochłodzić w temperaturze otoczenia przez 1 h. Następnie należy próbkę z lepiszczem asfaltowym umieścić w łaźni penetrometru i termostatować w temperaturze badania przez 1 h. Temperaturę podczas termostatowania oraz badania należy utrzymywać z dokładnością $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Badanie rozpoczyna się od opuszczenia igły, aż jej koniec zetknie się z jej odbitym obrazem na powierzchni próbki (położenie zerowe). Następnie należy zwolnić blokadę trzpienia na określony czas, zgodnie z normą PN-EN 1426 to 5 s. Za wynik przyjmuje się głębokość na jaką zanurzy się igła w próbce lepiscza asfaltowego wyrażona w dziesiątych milimetra. Zgodnie z normą PN-EN 1426 należy wykonać trzy pomiary za pomocą trzech oddzielnych igieł penetracyjnych w punktach oddalonych od siebie i od ścianek naczynia penetracyjnego o min. 10 mm. Na każdej próbce badanego asfaltu i mastyksu wykonano po 7 oznaczeń penetracji. Za wynik końcowy przyjmuje się średnią arytmetyczną z wyników pomiarów, których różnica nie może przekraczać 2 mm/10 dla asfaltów o penetracji do 49 mm/10 oraz 4 mm/10 dla asfaltów o penetracji w przedziale 50 – 149 mm/10.

Penetracja jest podstawową cechą lepiscza asfaltowego, za pomocą której klasyfikuje się asfalty drogowe zgodnie z normą PN-EN 12591, jak i asfalty modyfikowane polimerami zgodnie z normą PN-EN 14023.

- **Temperatura mięknięcia**

Temperaturę mięknięcia (T_{PIK}) oznaczono metodą „Pierścień i Kula”, zgodnie z normą PN-EN 1427. Jest to temperatura, w której asfalt osiąga w warunkach znormalizowanych określoną konsystencję, traktowana jest również jako umowna granica przejścia asfaltu ze stanu lepkośćprężystego w stan cieczy lepkiej. Badanie polega na przygotowaniu dwóch mosiężnych pierścieni ($\varnothing_{zew}=23$ mm) wypełnionych lepiszczem asfaltowym, a następnie umieszczeniu ich w szklanej zlewce wypełnionej cieczą, wodą destylowaną ($T_{PIK} < 80^\circ\text{C}$) lub gliceryną ($T_{PIK} \geq 80^\circ\text{C}$) w zależności od przewidywanej temperatury

mięknienia. Po 15 minutach termostatowania próbek w temperaturze 5°C (dla wody destylowanej) lub 30°C (dla gliceryny), należy obciążyć centralnie stalowymi kulami ($\varnothing=9,50$ mm i $m=3,50$ g) próbki asfaltu wypełniające mosiężne pierścienie. Zlewkę należy ogrzewać starając się zachować przyrost temperatury o wartości $(5,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}/\text{min}$, aż do momentu jak kula otoczona lepiszczem asfaltowym (mastyksem) zetknie się z dolną płytką aparatu (czyli pokonując odległość 25 mm). Za wynik oznaczenia temperatury mięknienia należy przyjąć średnia arytmetyczną z temperatur w których asfalt obciążony kulą stalową dotyka dolnej płytki aparatu. W przeprowadzonych badaniach użyto automatyczny aparat „Pierścień i kula” (rys. 5.6), który za pomocą czujników optycznych, odczytuje i rejestruje wartość temperatury mięknienia badanych materiałów. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem czterech próbek, kontrolując różnice wartości T_{PIK} , która zgodnie z normą PN-EN 1427 dla asfaltów niemodyfikowanych powinna być mniejsza niż 1°C, natomiast dla asfaltów modyfikowanych polimerami 1,5°C.

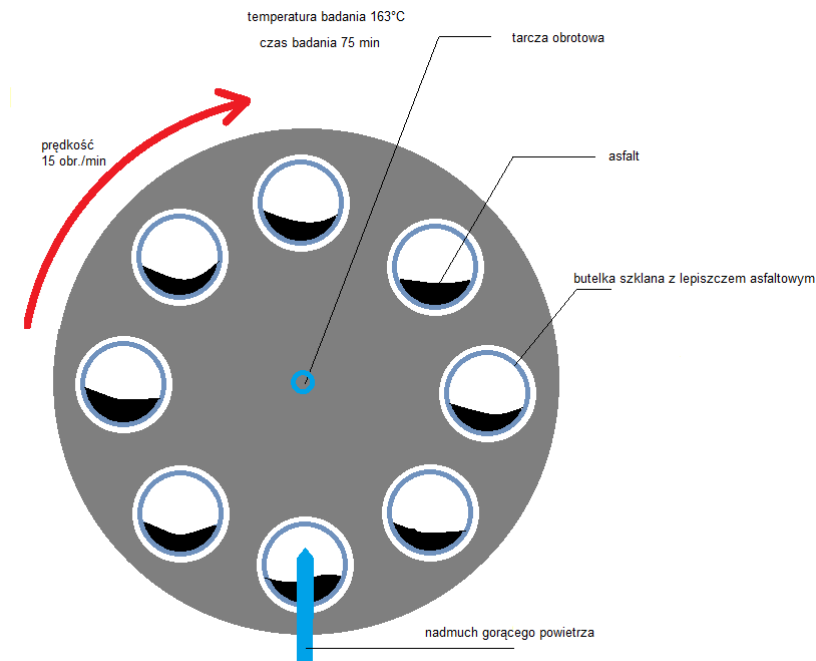


Rys. 5.6. Automatyczny aparat do oznaczania temperatury mięknienia wg metody „Pierścień i Kula”

- **Starzenie krótkoterminowe wg metody RTFOT**

Starzenie krótkoterminowe (nazywane również technologicznym) lepiszczy asfaltowych symulowano metodą RTFOT (*ang. Rolling Thin Film Oven Test*) zgodnie z normą PN-EN 12607-1. Starzenie to zachodzi podczas produkcji

mieszanki mineralno-asfaltowej, jej transportu i układania w warstwie nawierzchni oraz później podczas jej zagęszczania. Asphalt wówczas poddawany jest działaniu wysokiej temperatury (w zakresie od 140°C do 200°C), ale i tlenu zawartego w powietrzu. Najintensywniejszy przebieg starzenia asfaltów zachodzi na powierzchni ziaren kruszywa, ponieważ stosowana jest najwyższa temperatura, a warstwa asfaltu na kruszywie jest wtedy najcieńsza.



Rys.5.7. Schemat badania starzenia asfaltów metodą RTFOT [Bilski, 2017]

Podczas starzenia metodą RTFOT, gorące powietrze oddziałuje na próbki lepiska asfaltowego umieszczone w szklanych butelkach, które są obracane w tarczy aparatu z prędkością 15 obr./min. Schemat badania starzenia przedstawiono na rys. 5.7. Rozgrzanym asfaltem zalewamy szklane butelki (masa lepiska asfaltowego $35,0 \pm 05$ g). Następnie szklane butelki z badanym lepiskiem umieszcza się w tarczy aparatu w temperaturze $(163 \pm 1)^\circ\text{C}$, obracające butelki dodatkowo poddawane są nadmuchi gorącego powietrza przez (75 ± 1) min. Starzeniu poddano wszystkie badane lepiska asfaltowe, natomiast nie poddawano starzeniu mastyksów asfaltowych. **Przygotowując próbki mastyksów po starzeniu RTFOT, wykorzystano asfalty bazowe postarzone metodą RTFOT i połączone je z wypełniaczem.** Wstępne próby starzenia mastyksów się nie powiodły. Wypełniacz osadzał się na dnie szklanej

butelki do starzenia i występowały trudności w skutecznym odzyskaniu próbki mastyksu.

5.3. Badania cech reologicznych asfaltów i mastyksów

- **Badania w reometrze dynamicznego ścinania (DSR)**

Program badawczy niniejszej rozprawy doktorskiej zakładał wykonanie badań zachowania asfaltów oraz mastyksów asfaltowych w temperaturach eksploatacyjnych. Zrealizowano to przy zastosowaniu różnego rodzaju obciążeń oraz zakresów temperatur przy użyciu reometru dynamicznego ścinania (DSR – Dynamic Shear Rheometer) typu Physica MCR, rys. 5.8.a.



a)



b)

Rys. 5.8. Reometr DSR typu Physica MCR 101: a) widok ogólny reometru; b) zastosowane wrzeciona obrotowe o średnicy $\text{Ø}25$ oraz $\text{Ø}8$ mm

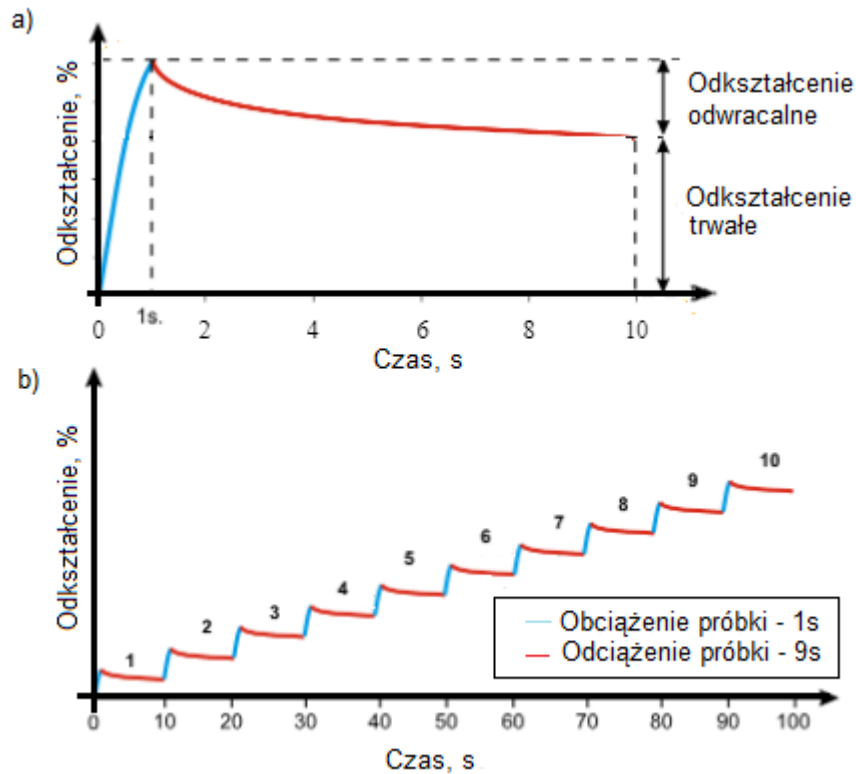
Badania przeprowadzono przy zmiennych warunkach pomiarowych, zastosowano cztery programy badawcze:

- a) badanie w zróżnicowanej temperaturze; zastosowano układ pomiarowy dwóch płyt pomiarowych równoległych o średnicy $\varnothing 8$ mm. Próbki badanych materiałów o masie 75-80 mg dla asfaltów, 120-125 mg dla mastyksów granodiorytowych oraz 125-130 mg dla mastyksów wapiennych i bazaltowych, odważano na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 0,001 g. Próbki wypełniały szczelinę o wysokości 1,5 mm pomiędzy płytą ruchomą i nieruchomą. Zastosowano zmienną temperaturę pomiaru, w zakresie od $+82^{\circ}\text{C}$ do -36°C , przy czym co 1 min następowało obniżenie temperatury o 1°C . Badania przeprowadzono przy częstotliwości kątowej drgań równej 10 rad/s oraz przy zmiennej logarytmicznie wartości amplitudy drgań, od 10 mrad w temperaturze 82°C do 0,1 mrad w temperaturze -36°C .
- b) badania w zakresie wysokich temperatur od 82°C do 46°C , ze skokiem co $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$, przy czym w każdej z temperatur zastosowano zmienną częstotliwość od 100 Hz do 0,1 Hz. Zastosowano układ pomiarowy dwóch płyt równoległych o średnicy $\varnothing 25$ mm oraz szczelinę o wysokości 1 mm. Masa próbek również była zmienna, tzn. dla asfaltów wynosiła 500-510 mg, natomiast dla mastyksów granodiorytowych 770-780 mg, wapiennych i bazaltowych 815-820 mg.



Rys. 5.9. Komplet próbek asfaltu modyfikowanego 3%SBS do badania w reometrze DSR o średnicy $\varnothing 25$ oraz $\varnothing 8$ mm na podkładce silikonowej

- c) Badanie przy pośrednich niskich temperaturach eksploatacyjnych tzn. zastosowano zmienną temperaturę pomiaru w zakresie od 40°C do -36°C , przy czym temperaturę obniżano skokowo co $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Zastosowano układ



Rys. 5.10. Zasada wykonania testu MSCR, przy jednej wartości naprężenia ścinającego [Błażejowski i inni, 2021]

pomiarowy dwóch płyt pomiarowych równoległych o średnicy $\varnothing 8$ mm. Masa próbek materiałów oraz wysokość szczeliny pomiarowej jak w opisie programu badawczego w części a. W każdej z zadanych temperatur badania zastosowano stałą wartość amplitudy drgań równą 1 mrad oraz przy zmiennej logarytmicznie wartości częstotliwości drgań, w zakresie od 100 Hz do 0,1 Hz.

- d) MSCR (ang. *Multiple Stress Creep Recovery*), badanie cyklicznego pełzania z odprężeniem przy użyciu układu płyt równoległych o średnicy 25 mm i wysokości szczeliny pomiarowej równej 1 mm. W badaniu zastosowano zmienną temperaturę, tj. w zakresie od 82°C do 46°C ze skokiem co 6°C. W każdej z zadanych temperatur badanie składało się z następujących etapów: cykl pełzania (obciążenie próbki lepiszcza asfaltowego przez okres 1 sekundy), cykl odprężania (odciążenie naprężeń próbki lepiszcza asfaltowego przez okres 9 sekund). Pojedynczy cykl trwa 10 sekund i powtarzano go 10-krotnie, co graficznie zaprezentowano na rys. 5.10. Badanie wykonano przy trzech różnych wartościach naprężeń ścinających 0,1 kPa; 3,2 kPa oraz 10 kPa. Badanie rozpoczynało się od przyłożenia najmniejszego z naprężeń ścinających

(0,1 kPa), próbkę poddawano 10 cyklom obciążenia i odciążenia, następnie zmieniano naprężenie i przeprowadzono analogiczne badanie dla każdego z poziomów naprężenia temperatury.

Parametry, które wyznacza się w teście MSCR to: nieodwracalna podatność na pełzanie J_{nr} oraz procentowy nawrót R . Zgodnie z [Król i inni, 2014; Król i inni, 2017] do ich obliczenia można wykorzystać następujące wzory:

$$R = \frac{\sum_1^{10} \varepsilon_r(\tau, N)}{10} \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}) \cdot 100 / \varepsilon_1 \quad (5.7)$$

$$J_{nr} = \frac{\sum_1^{10} J_{nr}(\tau, N)}{10} \quad (5.8)$$

$$J_{nr}(\tau, N) = \varepsilon_{10} / \tau \quad (5.9)$$

gdzie:

τ – wartość naprężenia, kPa

N – numer cyklu,

ε_1 – przyrost odkształcenia po 1 sekundzie naprężenia (koniec fazy pełzania),

ε_{10} – przyrost odkształcenia na koniec cyklu (koniec fazy nawrotu).

- **Badanie w reometrze zginanej belki (BBR)**

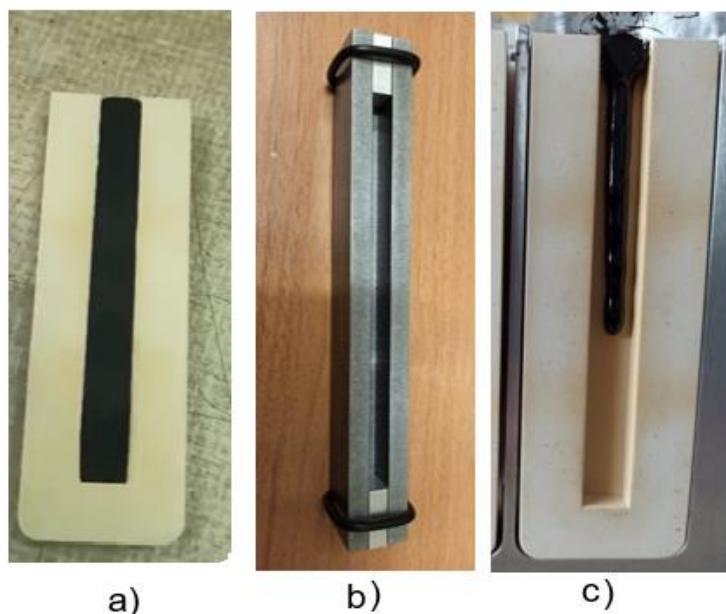
Program badawczy niniejszej rozprawy doktorskiej zakładał ocenę zachowania asfaltów i mastyksów w niskich temperaturach eksploatacyjnych na podstawie badań przeprowadzonych metodą reometru zginanej belki BBR (ang. *Bending Beam Rheometer*) zgodnie z normą PN-EN 14771 (rys.5.11). W trakcie badań mastyksów wystąpił problem z przygotowaniem próbek belek mastyksów asfaltowych, przy czym korzystano zarówno z form silikonowych jak i metalowych (rys. 5.12. c). Niezależnie od zastosowanych form do badania i temperatur rozgrzewania mastyksów asfaltowych nie było możliwości przygotowania jednorodnej mastyksowej belecarki. W związku z tym badania przeprowadzono wyłącznie na próbkach lepiszczy asfaltowych.



5.11. Reometr zginanej belki BBR

Badanie asfaltów przed i po starzeniu metodą RTFOT przeprowadzono w trzech temperaturach: -16°C , -24°C oraz -32°C . Starano się dobrać temperatury badania w ten sposób, aby określić temperatury w których moduł sztywności $S=300$ MPa oraz parametr $m = 0,3$. Próbki przygotowano zmodyfikowaną (rys. 5.12.) metodą w stosunki do normy PN-EN 14771. Wykorzystano formy silikonowe dołączone do reometru przez producenta. Stosując do badań formę silikonową (rys. 5.12 a) uzyskujemy próbkę o idealnej powierzchni, bez nierówności wynikających chociażby z trudności ze ścięciem rozgrzanym nożem asfaltów wysokomodyfikowanych; jak w metodzie normowej w tradycyjnych formach metalowych (rys. 5.12 b). Za pomocą form kształtuje się belkę asfaltową o wysokości 6,3 mm; szerokości 12,7 mm oraz długości 127,0 mm. Tak przygotowaną w formie silikonowej belkę asfaltową należy umieścić w zamrażarce na okres maksymalnie 5 min w celu rozformowania próbki. Następnie należy termostatować próbkę w łaźni reometru BBR w zadanej temperaturze pomiaru przez okres 60 min. W badaniach skrócono czas termostatowania próbek do 30 minut. Ze względu na niewielką objętość próbek asfaltowych stwierdzono, że jest to czas wystarczający. Przed rozpoczęciem badania należy reometr BBR poddać kalibracji przy użyciu zestawu kalibracyjnego w celu uzyskania prawidłowych odczytów, zarówno z czujnika siły, jak i przemieszczenia. Po okresie termostatowania próbkę umieszcza się na podporach i obciąża w środku rozpiętości, schemat obciążenia przedstawiono na rys. 5.13. Badanie rozpoczyna się od przyłożenia obciążenia wstępnego o wartości (980 ± 10) mN na czas 1 sekundy, następnie przez 20 sekund należy

utrzymać obciążenie kontaktowe ($25 \div 45$) mN. Po tym czasie przykłada się obciążenie próbki siłą skupioną o wartości (980 ± 10) mN przez okres 240 s; w określonych odstępach czasu po 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s i 240 s mierzone jest ugięcie próbki w środku rozpiętości. Następnie próbkę odciążono przykładając siłę o wartości (35 ± 10) mN przez czas 10 sekund. W badaniach w każdej z założonych temperatur wykorzystano po cztery belki asfaltowe.



Rys. 5.12. Formy do przygotowanie próbek asfaltowych do badania metodą reometru BBR a) próbka lepiszcza asfaltowego w formie silikonowej; b) normowa metalowa forma; c) nieudana próba przygotowania beleczki z mastyksu asfaltowego

W reometrze BBR oznacza się moduł sztywności (wzór 5.10) oraz parametr m (m -value) (wzór 5.11) po 60 s obciążenia, na podstawie obserwacji zjawiska pełzania asfaltu poprzez przyłożenie siły skupionej w połowie rozpiętości belki asfaltowej swobodnie podpartej. Na podstawie zarejestrowanych wartości siły oraz ugięcia należy obliczyć wartości modułów sztywności oraz m -value, zgodnie ze wzorami wg PN-EN 14771:

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta(t)} \quad (5.10)$$

gdzie:

$S(t)$ – moduł sztywności, MPa

P – siła skupiona, N

l – odległość pomiędzy podporami, mm

h – wysokość próbki, mm

b – szerokość próbki, mm

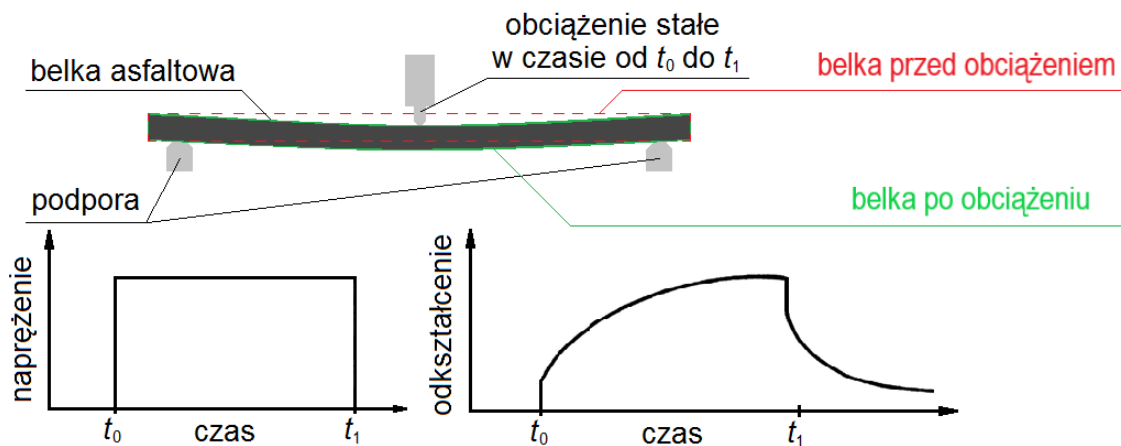
$\delta(t)$ – ugięcie próbki w funkcji czasu, mm

$$m(t) = \frac{\log S(t)}{\log(t)} \quad (5.11)$$

gdzie:

$m(t)$ – wartość parametru m w chwili t , -

$S(t)$ – wartość modułu sztywności próbki asfaltowej w chwili t , MPa



Rys. 5.13. Schemat obciążenia podczas badania asfaltu metodą reometru BBR [Bilski, 2017]

- **Relaksacja z zastosowaniem duktylometru w temperaturze -12°C**

Zjawisko relaksacji jakie zachodzi w asfaltach w niskich temperaturach obserwowano na podstawie badania w duktylometrze (rys.5.14). W badaniu wykorzystano założenia normy PN-EN 13589 oraz metody bezpośredniego rozciągania DTT (*ang. Direct Tension Test*). Próbkę asfaltu rozciąga się ze stałą prędkością 1 mm/min aż do osiągnięcia wartości siły rozciągającej 50 kN, następnie pozostawia się badaną próbkę w warunkach stałego odkształcenia, obserwując zjawisko relaksacji, polegające na systematycznym zmniejszaniu się

wartości mierzonej siły rozciągającej. Przygotowując próbkę (rys. 5.15) należy mosiężne formy zalać rozgrzanym lepiszczem lub mastyksem z lekkim nadmiarem. Następnie w środkowej części formy umieszcza się stalowy stempel w kształcie koła o średnicy 60 mm na silikonowej podkładce, w celu uzyskania równej powierzchni środkowej części próbki. Tak przygotowane formy z badanym materiałem pozostawia się do ostygnięcia w temperaturze pokojowej na okres 30 minut.

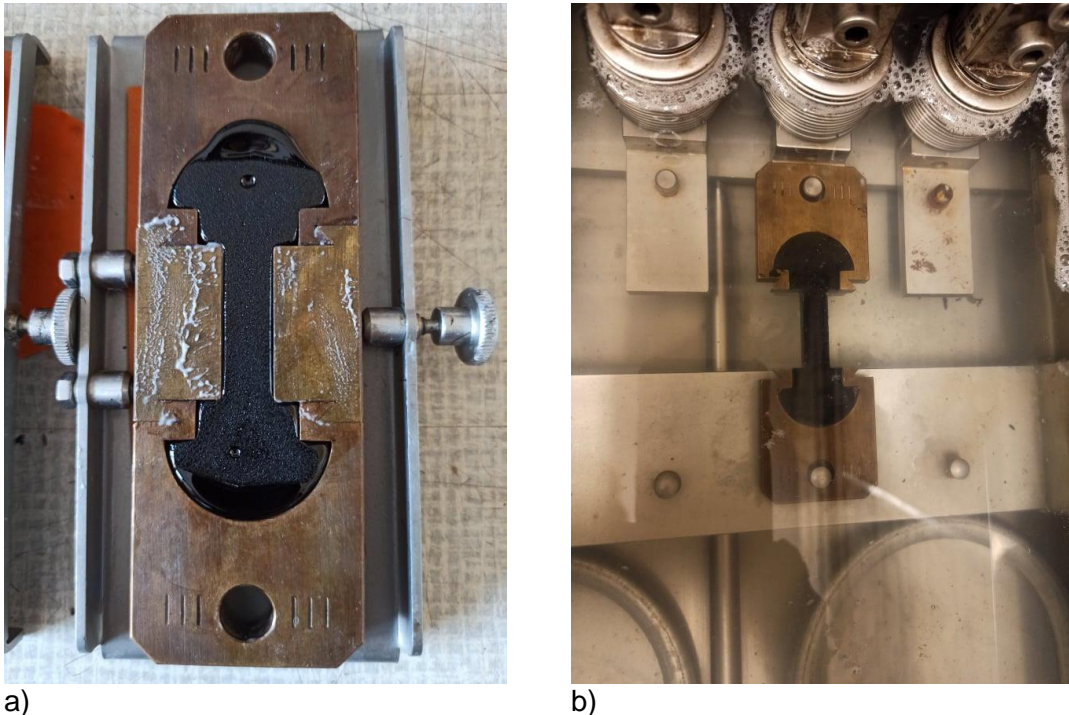


a)

b)

Rys. 5.14. Duktylometr wraz z zestawem ogrzewająco-chłodzącym (a) oraz mechanizm rozciągający (b)

Następnie należy termostatować próbki w złożonej formie w łaźni duktylometru wypełnionej mieszaniną 70% wody destylowanej i 30% glikolu etylenowego przez okres 30 min w temperaturze badania, tj. -12°C . Po tym czasie można przystąpić do rozciągania próbek (badanie wykonuje się na pojedynczej próbce mimo dostępnych czterech stanowisk badawczych) i rejestracji siły rozciągającej (przy warunkach stałego odkształcenia) przez okres 20 min. Badanie wykonano na czterech próbkach dla każdego z badanych lepiszczy oraz mastyksów.

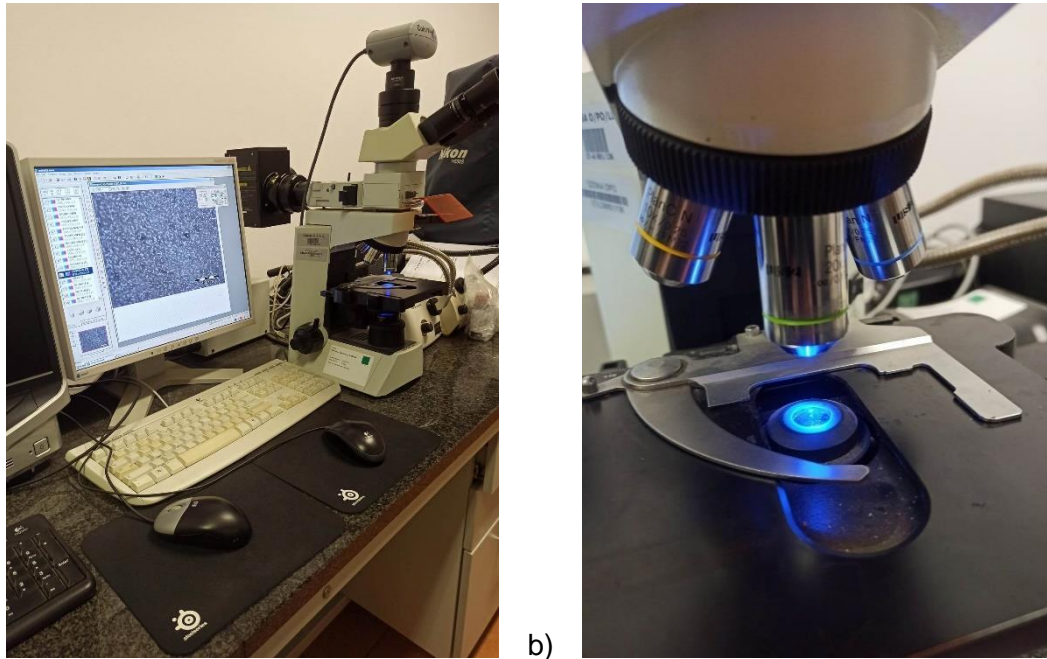


a) b)
Rys.5.15. Próbkę mastyksu 3%SBS+WW (a) w trakcie obserwacji zjawiska relaksacji w duktylocetrze (b)

Badania właściwości reologicznych lepiszczy i mastyksów asfaltowych przeprowadzono w laboratorium drogowym Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Poznańskiej.

5.4. Ocena morfologii asfaltów i mastyksów na podstawie obrazów mikroskopowych

Oceny obrazu mikroskopowego dokonano na podstawie normy PN-EN 13632:2012 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Wzrokowa ocena zdyspergowania polimeru w asfaltach modyfikowanych polimerami”. Badanie wykonano z wykorzystaniem mikroskopu fluorescencyjnego z lampą UV na świeżych przełomach próbek asfaltów i mastyksów (rys. 5.16). Próbki przygotowano za pomocą form silikonowych, wykonując krążki o średnicy 30 mm (przedstawione na rys. 5.17) i zamrażając je w temperaturze -20°C .



Rys. 5.16. a) Stanowisko do badań wyposażone w mikroskop z kamerą UV, b) przybliżenie na zestaw obiektywów

Następnie przed badaniem rozkruszono zamrożone próbki, tak aby uzyskać płaskie powierzchnie przełomów. Oceny zdyspersowania polimeru w asfaltach i mastyksach dokonano w Wydziale Technologii, Laboratorium Drogowym GDDKiA, oddział w Poznaniu. Badanie wykonano w układzie optycznym stosując obiektyw 20x (powiększenie 200-krotne).



Rys. 5.17. Zamrożone próbki mastyksów

Na podstawie normy PN-EN 13636, obraz struktury asfaltów modyfikowanych polimerami można opisać za pomocą oznaczeń literowych (tab. 5.1).

Tab. 5.1. Opis literowy obrazu struktury asfaltów modyfikowanych zgodnie z PN-EN 13636

Ciągłość fazy	P – ciągła faza polimerowa B – ciągła faza asfaltowa
Opis fazy	X – ciągłość obu faz H – homogeniczny I – niehomogeniczny
Opis rozmiaru	S – małe (< 10 μm) M – średnie (10 - 100 μm) L – duże (> 100 μm)
Opis kształtu	r – okrągłe lub obłe s – podłużne o – inne

5.5. Metody statystyczne stosowane do wyznaczania niepewności pomiarowych oraz istotności wyników

Wyniki pomiarów przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej zostały poddane analizie statystycznej polegającej na odrzuceniu wyników odstających, tzn. obarczonych błędem grubym z wykorzystaniem testu Grubbsa oraz Hampela [Konieczka i inni 2007]. Test Grubbsa umożliwia wykrycie jednej wartości odstającej, co wiąże się z koniecznością powtarzania testu aż do momentu niezaobserwowania wartości odstających wśród analizowanych wyników badań. Test ten bazuje na wartościach odchylenia standardowego w jednozmiennym zbiorze pomiarów. Test jest zdefiniowany dla hipotezy zerowej (gdy w zbiorze brak jest wyników odstających) oraz dla hipotezy alternatywnej (podczas gdy w zbiorze wyników znajduje się chociaż jeden wynik odstający). Parametr testu Grubbsa oblicza się zgodnie z poniższym wzorem [Konieczka i inni, 2007]:

$$G = \frac{\max|x_i - \bar{x}|}{S_x} \quad (5.8)$$

gdzie:

x_i – wynik i-tego pomiaru,

\bar{x} – średnia arytmetyczna,

S_x – odchylenie standardowe,

G – parametr testu Grubbsa.

Jeżeli parametr testu G spełnia nierówność (wzór 5.9) to hipoteza zerowa zostaje odrzucona.

$$G > \frac{n-1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{t_{(\frac{\alpha}{2n}, n-2)}^2}{n-2 + t_{(\frac{\alpha}{2n}, n-2)}^2}} \quad (5.9)$$

gdzie:

n – liczba pomiarów,

$t_{(\frac{\alpha}{2n}, n-2)}$ – wartość krytyczna rozkładu t-Studenta przy liczbie stopni swobody $n-2$ i poziomie istotności $\frac{\alpha}{2n}$.

Tab. 5.2. Wartości krytyczne testu Grubbsa [Konieczka i inni, 2007]

Liczba pomiarów	Wartości krytyczne, test jednostronny
3	1,155
4	1,481
5	1,715
6	1,887
7	2,020
8	2,126
9	2,215
10	2,290

Następnie obliczoną wartość parametru testu Grubbsa G należy porównać z wartościami krytycznymi, przedstawionymi w tab. 5.2 dla $\alpha = 0,05$ oraz liczby pomiarów ≤ 10 [Konieczka i inni, 2007].

W pracy wykorzystano także test Hampela, za pomocą którego również można odrzucić wartości odbiegające. Test ten bazuje na wartościach mediany M_e dla zbioru danych liczbowych. Należy obliczyć wartości bezwzględnych odchyłeń, oznaczonych $|r_i|$, od wartości mediany dla każdego wyniku, zgodnie ze wzorem:

$$|r_i| = |x_i - M_e| \quad (5.10)$$

gdzie:

$|r_i|$ – wartość bezwzględna z odchylenia od wartości mediany dla każdego wyniku,

M_e – mediana zbioru wyników.

Następnie należy obliczyć wartość mediany odchyłeń $M_{e|r_i|}$ i sprawdzić obecność wyników odstających na podstawie kryterium $|r_i| \geq 4,5 \cdot M_{e|r_i|}$. Jeżeli ten warunek został spełniony to wynik uznaje się za odstający i go odrzuca się [Konieczka i inni, 2007].

Obliczono również z przyjętym prawdopodobieństwem $P_u = 95\%$ przedziały niepewności pomiarów bezpośrednich, tzn. takich, których wartości są mierzone za pomocą jednego aparatu pomiarowego bezpośrednio, bez konieczności wykonania dodatkowych obliczeń. Przedstawiono je w postaci $\bar{x} \pm U(x)$, co oznacza średnią arytmetyczną \pm niepewność rozszerzoną (wzór 5.11), czyli określono przedział wokół uzyskanego wyniku badania, w którym spodziewany się z odpowiednim poziomem istotności wartości oczekiwanej. Niepewność rozszerzoną obliczany za pomocą wzoru :

$$U(x) = k \cdot u_c(x) \quad (5.11)$$

gdzie:

$U(x)$ – niepewność rozszerzona,

k – kwantyl rozkładu normalnego (w naszym przypadku rozkładu t-Studenta, ponieważ $n < 10$),

$u_c(x)$ – niepewność całkowita standardowa.

Niepewność całkowita standardowa jest to suma niepewności standardowej $S_{\bar{x}}$, niepewności standardowej wzorcowania $\Delta_d(x)$ oraz niepewności standardowej eksperymentatora $\Delta_e(x)$.

$$u_c(x) = \sqrt{S_{\bar{x}}^2 + \frac{\Delta_d(x)^2}{3} + \frac{\Delta_e(x)^2}{3}} \quad (5.12)$$

Do analizy wpływu zawartości kopolimeru oraz różnych wypełniaczy w mastyksach zastosowano analizę wariancji dwuczynnikową, która zakłada, że każdy układ $[A_i, B_j]$, $i = 1, 2, \dots, a$, $j = 1, 2, \dots, b$ wyznacza łączny wariant czynników. Dysponujemy więc $ab = 20$ wariantami, wyznaczającymi podział pomiarów na grupy zwane komórkami. Pomiarów dokonano dla wszystkich komórek, tj. kombinacji poziomów czynników. Dla każdego z n wariantów dokonano po r pomiarów, czyli badania są przeprowadzone według pełnego eksperymentu czynnikowego w układzie zrównoważonego eksperymentu z replikami.

Analizę dwuczynnikową zastosowano, ponieważ są podstawy do wysunięcia hipotezy, że na badaną cechę mierzalną X wpływa jednocześnie: jeden z wariantów czynnika A oraz jeden z wariantów czynnika B .

W zrównoważonym eksperymencie z replikami komórki traktujemy jako r -elementowe próby pobrane z populacji dla wariantu $[A_i, B_j]$. Ogólna liczba pomiarów w tym eksperymencie wynosi $n = abr$

W przeprowadzonym eksperymencie ogólna suma kwadratów SS rozłożona jest na cztery addytywne składniki $SS(A)$, $SS(B)$, $SS(AB)$ i SSE , tj.

$$SS = SS(A) + SS(B) + SS(AB) + SSE$$

Pierwsze dwie sumy kwadratów $SS(A)$ i $SS(B)$ dotyczą efektów głównych. Z kolei, suma $SS(AB)$ dotyczy efektu interakcyjnego.

Stopnie swobody zrównoważonego eksperymentu dwuczynnikowego z r replikami są również addytywne, tj.

$$abr - 1 = (a - 1) + (b - 1) + (a - 1)(b - 1) + ab(r - 1)$$

Aby zweryfikować postawioną hipotezę badawczą obliczenia zestawione są zgodnie z podaną tablicą ANOVA.

Tab.5.3. ANOVA zrównoważonego eksperymentu dwuczynnikowego z r replikami

Źródło	Stopnie swobody	Sumy kwadratów	Średnie kwadratów	Statystyka F
A	$a - 1$	$SS(A)$	$MS(A)$	$MS(A)/MSE$
B	$b - 1$	$SS(B)$	$MS(B)$	$MS(B)/MSE$
AB	$(a - 1)(b - 1)$	$SS(AB)$	$MS(AB)$	$MS(AB)/MSE$
Błąd	$ab(r - 1)$	SSE	MSE	
Ogółem	$abr - 1$	SS		

W celu dokonania obliczeń elementów zawartych w tab.5.3. wyniki pomiarów wskaźnika koleinowania ($G^*/\sin\sigma$) i średnie arytmetyczne zostały przygotowane według układu danych zestawionych zgodnie z tab.5.4.

Tab.5.4. Układ danych dla zrównoważonego układu dwuczynnikowego

$A \setminus B$	B_1	B_2	...	B_b	Średnia
A_1	x_{111}, \dots, x_{11r}	x_{121}, \dots, x_{12r}	...	x_{1b1}, \dots, x_{1br}	\bar{A}_1
A_2	x_{211}, \dots, x_{21r}	x_{221}, \dots, x_{22r}	...	x_{2b1}, \dots, x_{2br}	\bar{A}_2
...
A_a	x_{a11}, \dots, x_{a1r}	x_{a21}, \dots, x_{a2r}	...	x_{ab1}, \dots, x_{abr}	\bar{A}_a
Średnia	\bar{B}_1	\bar{B}_2	...	\bar{B}_b	\bar{x}

gdzie:

a jest liczbą poziomów czynnika A ,

b jest liczbą poziomów czynnika B ,

r jest wspólną liczebnością komórek,

n jest liczebnością wszystkich obserwacji,

x_{ijk} jest k -tym ($k = 1, 2, \dots, r$) pomiarem kombinacji i -tego ($i = 1, 2, \dots, a$) poziomu czynnika A oraz j -tego ($j = 1, 2, \dots, b$) poziomu czynnika B .

$\bar{A}_i = \frac{1}{br} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r x_{ijk}$ jest średnią z obserwacji otrzymanych dla i -tego poziomu czynnika A ,

$\bar{B}_j = \frac{1}{ar} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^r x_{ijk}$ jest średnią z obserwacji otrzymanych dla j -tego poziomu czynnika B ,

$\bar{x} = \frac{1}{abr} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r x_{ijk}$ jest średnią ogólną ze wszystkich obserwacji,

$\overline{A_i B_j} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r x_{ijk}$ jest średnią z obserwacji otrzymanych dla i -tego poziomu czynnika A oraz j -tego poziomu czynnika B .

Tab.5.5. Sumy kwadratów dwuczynnikowej klasyfikacji danych

$CM = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2$ poprawka dla średniej,
$SS = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r x_{ijk}^2 - CM$ ogólna suma kwadratów odchyleń,
$SS(A) = \frac{1}{br} \sum_{i=1}^a \left(\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 - CM$ suma kwadratów dla czynnika A ,
$SS(B) = \frac{1}{ar} \sum_{j=1}^b \left(\sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 - CM$ suma kwadratów dla czynnika B ,
$SS(AB) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \left(\sum_{k=1}^r x_{ijk} \right)^2 - SS(A) - SS(B) - CM$ suma kwadratów dla interakcji AB .

Przeprowadzenie testów analizy wariancji wymaga założenia, że badana cecha mierzalna X ma rozkład $\mathcal{N}(\mu_{ij}, \sigma)$, $i = 1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, b$ o nieznanym parametrach, ale równych wariancjach. Założenie równości wariancji wynika z jednakowej dokładności pomiarowej zastosowanej metody badawczej. Ze

względu na małe liczebności prób test równości wariancji ma małą moc odrzucania fałszywej hipotezy o równości wariancji.

Testy ANOVA przeprowadzane są według schematów zestawionych w tab.5.6.

Tab. 5.6. Testy ANOVA

<p>Test dla interakcji</p> <p>H_0: Brak wzajemnych oddziaływań pomiędzy wartościami oczekiwanymi dla wszystkich poziomów czynników A i B,</p> <p>H_1: Istnieje wzajemne oddziaływanie czynników A i B,</p> <p>Statystyka testowa: $F_{AB} = \frac{MS(AB)}{MSE}$, obszar krytyczny: $F > F_{1-\alpha;(a-1)(b-1);ab(r-1)}$</p>
<p>Test efektów czynnika A</p> <p>H_0: Brak różnic między wartościami oczekiwanymi dla wszystkich poziomów czynnika A,</p> <p>H_1: Co najmniej dwie wartości oczekiwane czynnika A istotnie różnią się,</p> <p>Statystyka testowa: $F_A = \frac{MS(A)}{MSE}$, obszar krytyczny: $F > F_{1-\alpha;(a-1);ab(r-1)}$,</p>
<p>Test efektów czynnika B</p> <p>H_0: Brak różnic między wartościami oczekiwanymi dla wszystkich poziomów czynnika B,</p> <p>H_1: Co najmniej dwie wartości oczekiwane czynnika B istotnie różnią się,</p> <p>Statystyka testowa: $F_B = \frac{MS(B)}{MSE}$, obszar krytyczny: $F > F_{1-\alpha;(b-1);ab(r-1)}$,</p>

W eksperymencie czynnikowym, jeżeli różnica oczekiwanych wartości dla poziomów czynnika A zależy od różnicy wartości oczekiwanych dla poziomów czynnika B to mówimy, że czynniki A i B wzajemnie oddziałują na siebie lub że są w interakcji. Jeżeli ta różnica jest niezależna od poziomów czynnika B , to mówimy o braku interakcji pomiędzy A i B .

Testy dla efektów głównych są przeprowadzane, gdy nie istnieją interakcje pomiędzy czynnikami. Oznacza to, że najpierw należy zbadać, czy istnieją

interakcje. Jeżeli interakcje są istotne, to nie należy przeprowadzać testów dla efektów głównych. Uwaga winna się koncentrować na lokalizacji ekstremalnych wartości oczekiwanych dla komórek. W tym celu wyznaczane są $100(1 - \alpha)$ procentowe przedziały ufności dla oczekiwanych wartości wskaźnika odkształcalności μ_{ij} ($i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b$) związanych z kombinacjami czynników $A_i B_j$. Sposób wyznaczenia tych przedziałów podany jest w tab.5.7.

Tab.5.7. Konstrukcja przedziału ufności dla komórek

$\overline{A_i B_j} \pm t_{\frac{\alpha}{2}; ab(r-1)} \frac{s}{\sqrt{r}}$
gdzie
$(1 - \alpha) \in (0, 1)$ jest poziomem ufności,
r jest liczbą obserwacji w jednej komórce,
$t_{\frac{\alpha}{2}; ab(r-1)}$ jest kwantylem t -Studenta z $ab(r - 1)$ stopniami swobody,
$s = \sqrt{MSE}$ jest estymatorem błędu modelu,
$\overline{A_i B_j}$ jest średnią arytmetyczną dla komórki $A_i B_j$.

Badanie istotności różnic $\mu_{ij} - \mu_{lk}$ oczekiwanych wartości parametru dla dwóch różnych kombinacji czynników przeprowadzane jest poprzez wyznaczenie $100(1 - \alpha)$ procentowych przedziałów ufności zgodnie ze wzorem (5.13) na podstawie pomiarów zestawionych w komórkach $A_i B_j$ i $A_l B_k$

$$(\overline{A_i B_j} - \overline{A_l B_k}) \pm t_{\frac{\alpha}{2}; ab(r-1)} \frac{s}{\sqrt{r}} \quad (5.13)$$

6. WYNIKI BADAŃ WYPEŁNIACZY, LEPISZCZY I MASTYKSÓW ASFALTOWYCH I ICH ANALIZA

6.1. Wyniki badań wypełniaczy mineralnych

Wyniki podstawowych właściwości wypełniaczy zostały porównane z wymaganiami [WT-1, 2014]. Uziarnienie badanych wypełniaczy oznaczono metodą przesiewania w strumieniu powietrza zgodnie z metodyką opisaną w pkt. 5.1. Zastosowana metoda sitowa pozwala rozpoznać rozkład wielkości ziaren w wypełniaczu. Zastosowane wypełniacze przed przystąpieniem do badań zostały przesiane przez sito 0,125 mm, stąd też zawartość ziaren < 0,125 mm wynosi 100%, natomiast zróżnicowana jest ich zawartość ziaren < 0,063 mm. Najdrobniejszy okazał się wypełniacz wapienny (86% ziaren < 0,063 mm), zaś w przypadku wypełniacza granodiorytowego uzyskano 74% ziaren < 0,063 mm. W przypadku wypełniacza bazaltowego zawartość ziaren poniżej 0,063 mm wyniosła 82%. Wszystkie analizowane wypełniacze spełniają wymagania WT-1 pod względem uziarnienia.

Powierzchnię właściwą analizowanych próbek wypełniaczy określono metodą Blaine'a. Wyniki przedstawiono w tab. 6.1. Zastosowane dwa wypełniacze dodatkowe: bazaltowy oraz granodiorytowy charakteryzują się mniejszymi wartościami powierzchni właściwej w stosunku do tradycyjnie stosowanego wypełniacza wapiennego. Natomiast należy zaznaczyć, iż metoda Blaine'a ma relatywnie wąskie zastosowanie i powinna być wykorzystywana do pomiaru powierzchni właściwej w zakresie od 300 do 4000 cm²/g. Przy materiałach bardziej rozdrobionych, jakimi są wypełniacze mineralne może, dochodzić do błędów pomiarowych związanych tzw. hamowaniem gazokinetycznym (Grabowski, 2007). Oznaczenie powierzchni właściwej przeprowadzono na czterech próbkach każdego analizowanego wypełniacza.

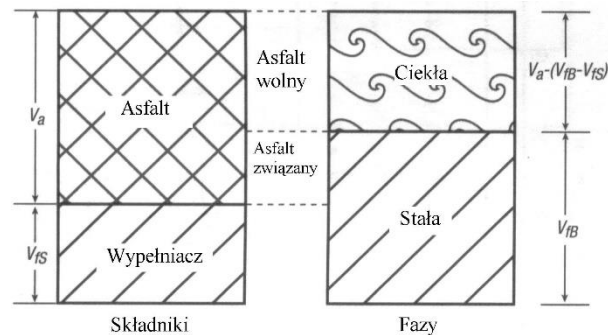
Tab. 6.1. Właściwości strukturalne badanych wypełniaczy mineralnych

Właściwości wypełniacza		Symbol jednostka	Badany materiał			Wymagania wg WT-1
Uziarnienie*	Wymiar otworu sita [mm]	[%]	WW	WB	WG	
	2		100	100	100	100
	0,125		100	100	100	85-100
	0,063		86	82	74	70-100
Jakość pyłów		MB _F [%]	2,3	3,6	2,0	≤10
Gęstość ziaren		ρ _r [g/cm ³]	2,712	2,763	2,593	Deklarowana przez producenta
Zawartość wolnych przestrzeni wg Rigden'a		RV [%]	36,5	42,5	42,6	28-45
Powierzchnia właściwa wg Blaine'a		P _w [cm ² /g]	4469	1806	2232	-

*wypełniacze przed przystąpieniem do badań zostały w całości przesiane przez sito 0,125 mm.

Zawartość wolnych przestrzeni oznaczono metodą Rigden'a, powtarzając czterokrotnie pomiar dla każdego z badanych wypełniaczy. Jest to parametr, który zawiera informację o zdolności nasycenia zastosowanego wypełniacza lepiszczem asfaltowym. Na dodatek jest to jeden z parametrów, który w znaczący sposób wpływa na właściwości lepkosprężyste mastyksów [Wilanowicz i inni, 2013; Faheem, 2010]. W dużej mierze właściwości mastyksów zależą od współoddziaływania ziaren wypełniacza z lepiszczem asfaltowym, które są „funkcją adsorpcji fizycznej i szeregu procesów sorpcyjnych oraz kapilarnej filtracji lepiszczą asfaltowego do ziaren wypełniacza” [Wilanowicz i inni, 2012]. Zjawisko zachodzące w mastyksie jest związane z występowaniem faz w wyniku połączenia asfaltu i wypełniacza, co graficznie zobrazowano na rys. 6.1. Część asfaltu, który wypełni pory między ziarnami wypełniacza, zwiększa objętość fazy stałej, jest to tzw. asfalt związany. Pozostała część asfaltu to asfalt wolny, stanowiący fazę ciekłą mastyksu. Zgodnie z wymaganiami WT-1 2014, wypełniacz powinien mieć zawartość wolnych przestrzeni w przedziale 28 ÷ 45%, uznaje się wówczas, że nie wykazuje on negatywnego wpływu na powstały mastyks. Wszystkie badane wypełniacze spełniają te wymagania, najmniejszą porowatością (zawartością wolnej przestrzeni) charakteryzuje się wypełniacz

wapienny, natomiast dwa pozostałe wypełniacze mają porównywalną zawartość wolnych przestrzeni, odpowiednio 42,5% dla wypełniacza bazaltowego oraz 42,6% dla wypełniacza granodiorytowego.



Rys. 6.1. Zawartość wolnej przestrzeni w układzie wypełniacz – asfalt [Wilanowicz J. i inni, 2012]

Badanie jakości pyłów metodą błękitu metylenowego ma na celu określenie zawartości materiałów ilastych. Ich nadmiar może wpływać na zjawisko pęcznienia w mastyksie oraz zwiększać zapotrzebowanie na asfalt. Zgodnie z WT-1 wskaźnik błękitu metylenowego MB_F powinien być $\leq 10\%$. Wszystkie badane materiały spełniają te wymogi, przy czym największą wartość wskaźnika MB_F wykazał wypełniacz bazaltowy, zgodnie z tab.6.1. W licznych pracach prof. W. Grabowskiego udowodniono, iż wskaźnik MB_F może mieć związek z zawartością wolnej przestrzeni w wypełniaczu [Grabowski, 2007; Wilanowicz i inni, 2015]

6.2. Podstawowe właściwości lepiszczy i mastyksów asfaltowych

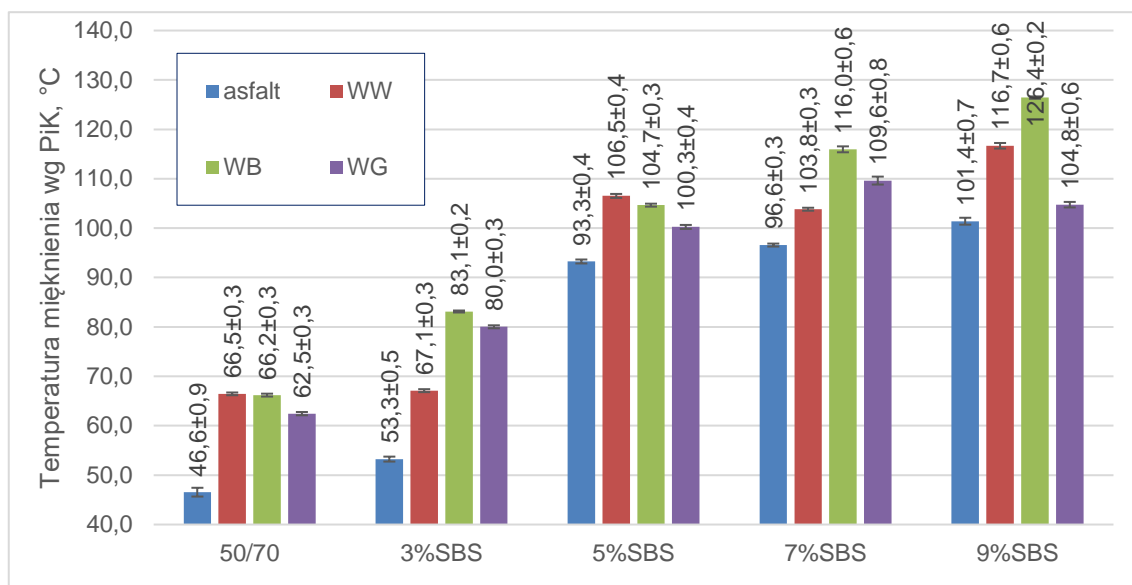
Ocenę właściwości funkcjonalnych, a zwłaszcza wpływ na usztywnienie asfaltu modyfikowanego kopolimerem SBS poprzez dodanie wypełniaczy mineralnych określono metodami pośrednimi, tzn. wykorzystano badania stosowane standardowo do oceny lepiszczy asfaltowych. W pracy szczególnie zwrócono uwagę na to aby określić wpływ różnego pochodzenia wypełniaczy mineralnych i stopień modyfikacji lepiszczy kopolimerem SBS na właściwości powstałych mastyksów, zarówno na etapie produkcji, jak i później podczas wbudowania w nawierzchnię (uwzględniono starzenie technologiczne), ponieważ

warunkować to powinno dobrą urabialność MMA, łatwe jej układanie i zagęszczanie w warstwach nawierzchni, jak również w czasie eksploatacji odporność na spękania niskotemperaturowe oraz powstawanie deformacji trwałych już w późniejszym okresie eksploatacji, zwłaszcza w okresie letnim.

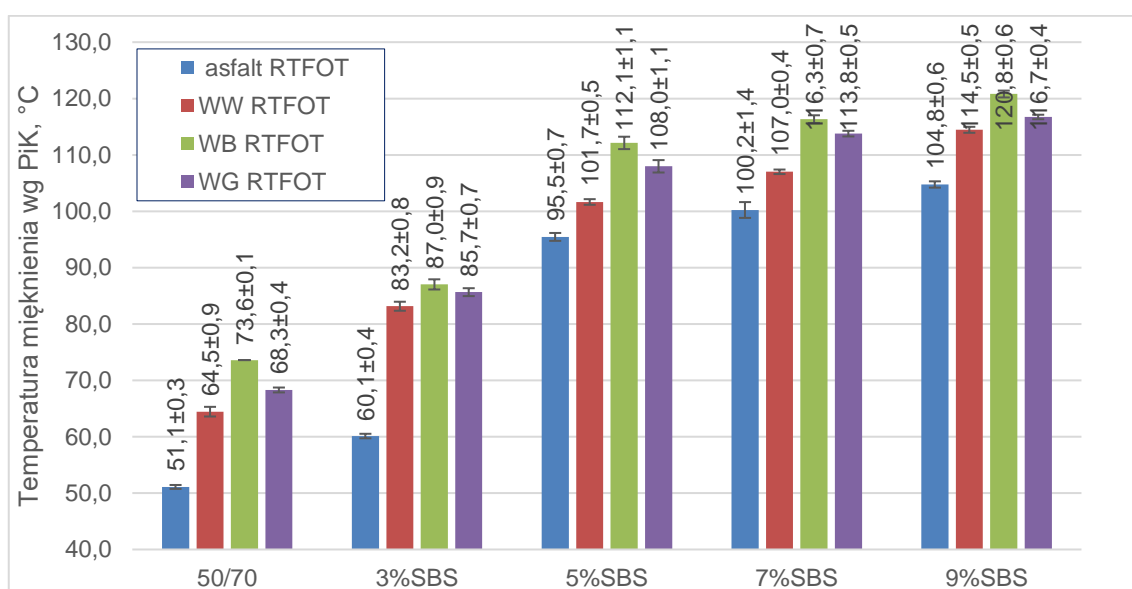
- **Temperatura mięknięcia wg metody „Pierścień i Kula”**

Temperaturę mięknięcia T_{PIK} oznaczono metodą „Pierścień i Kula” według normy PN-EN 1427, zgodnie z opisem badania zawartym w punkcie 5.2. Badaniom poddano asfalty modyfikowane kopolimerem SBS zarówno przed, jak i po procesie starzenia metodą RTFOT oraz wszystkie mastyksy uzyskane na bazie asfaltów bazowych tj. wapienny (WW), bazaltowy (WB) i granodiorytowy (WG). Oznaczenia wykonano na czterech próbkach każdego z badanych materiałów, natomiast na rys. 6.2 oraz 6.3 przedstawiono wyniki T_{PIK} wartości średniej w postaci przedziału ($\bar{x} \pm U(x)$), przy poziomie ufności $P_u = 95\%$ odpowiednio dla asfaltów i mastyksów, przed starzeniem i po starzeniu technologicznym metodą RTFOT. Na rys. 6.2 kolorem niebieskim oznaczono asfalt bazowy oraz mastyksy z wypełniaczem wapiennym (WW) – kolor czerwony, bazaltowym (WB) – kolor zielony oraz granodiorytowym (WG) - kolor fioletowy. Analogicznie na rys. 6.3 oznaczono asfalty i mastyksy po starzeniu metodą RTFOT.

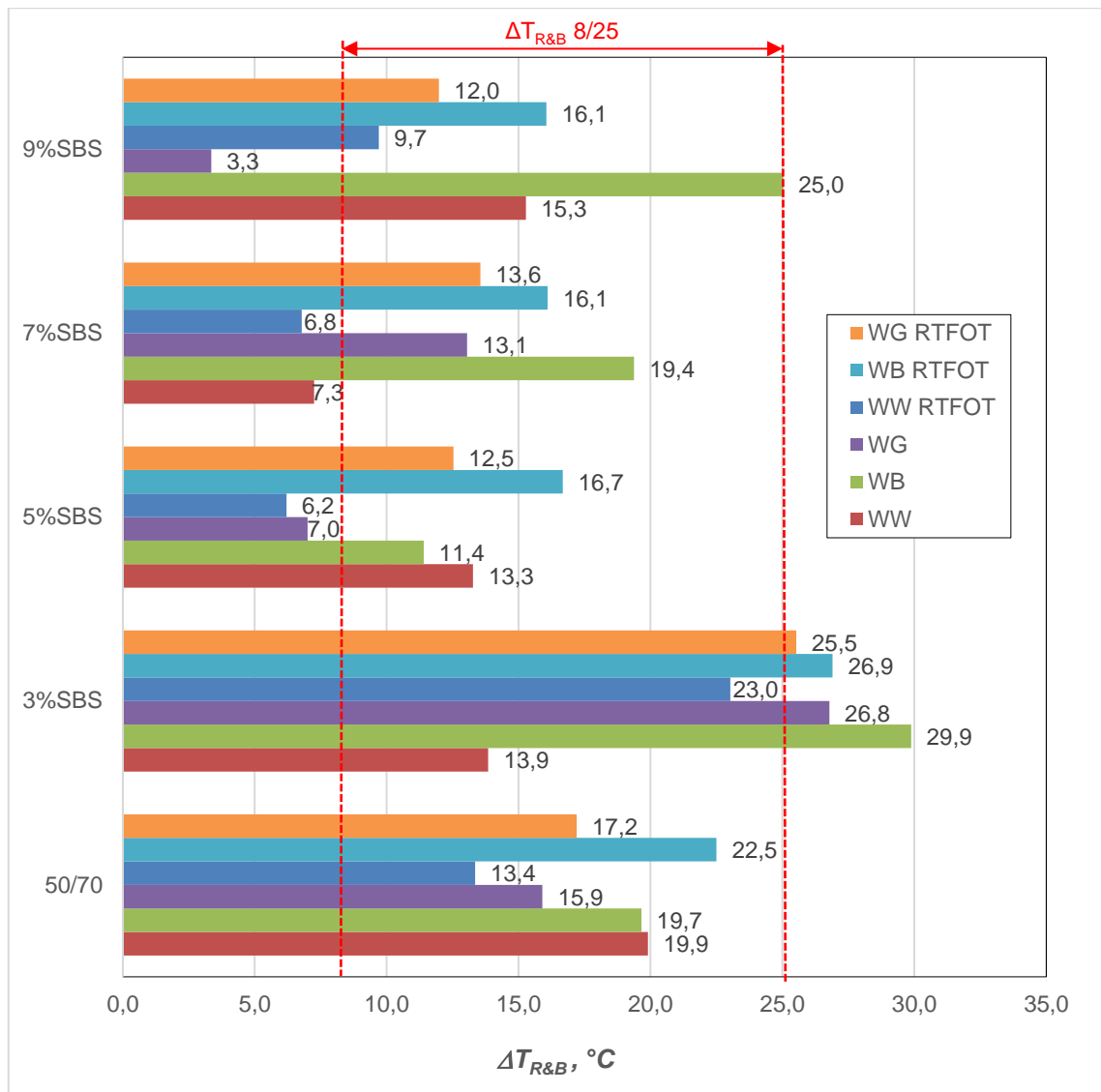
Analizując uzyskane wyniki oznaczenia temperatury mięknięcia zamieszczone na rys. 6.2 oraz 6.3 (po starzeniu metodą RTFOT) można zauważyć, że wzrost zawartości elastomeru SBS w asfalcie modyfikowanym skutkuje przyrostem temperatury mięknięcia. Efektywność modyfikacji wyraźnie widać w przypadku asfaltu o zawartości polimeru 5%, przyrost temperatury w stosunku do asfaltu wyjściowego 50/70 wyniósł aż 46,7°C. Następnie nastąpiła stabilizacja temperatury mięknięcia badanych asfaltów modyfikowanych na poziomie od 96,6°C do 101,4°C odpowiednio dla asfaltu 7%SBS i 9%SBS. Dodatkowo w wyniku starzenia asfaltu metodą RTFOT zaobserwowano przyrost temperatury mięknięcia asfaltów bazowych, największy odnotowano dla asfaltu 3%SBS.



Rys. 6.2. Wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia metodą „pierścień i Kula” badanych asfaltów i mastyków przed starzeniem



Rys. 6.3. Wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia metodą „Pierścień i Kula” badanych asfaltów i mastyków po starzeniu RTFOT



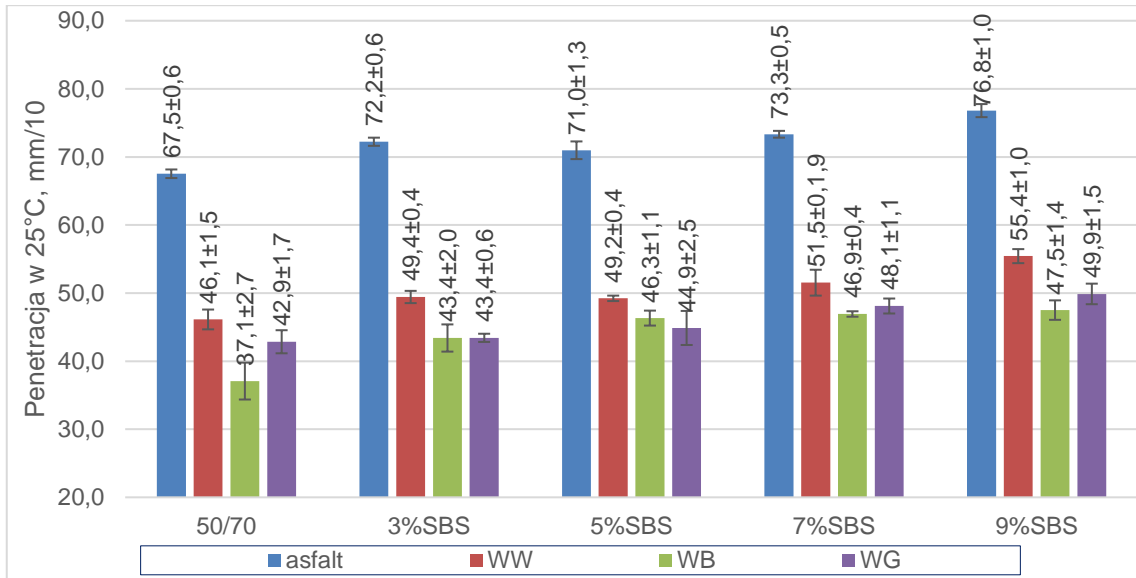
Rys. 6.4. Przyrost temperatury mięknienia mastyksów asfaltowych przed i po starzeniu metodą „Pierścień i Kula”

Przyrost temperatury mięknienia $\Delta T_{R\&B}$ (rys. 6.4) jest parametrem często opisywanym w literaturze jako miara efektu usztywnienia asfaltu po połączeniu z wypełniaczem. Wyraźnie widać usztywniające działanie wypełniaczy na lepizcza asfaltowe we wszystkich analizowanych mastyksach. Zgodnie z wymaganiami technicznymi [WT-1] przyrost temperatury mięknienia oznaczony metodą „Pierścienia i Kuli” zgodnie z PN-EN 13179:2013 powinien znajdować się w przedziale pomiędzy 8 a 25°C dla wypełniaczy zastosowanych w MMA. Największe oddziaływanie usztywniające ($\Delta T_{R\&B} > 25^\circ\text{C}$) odnotowano dla mastyksu 3%SBS z udziałem wypełniacza bazaltowego (29,9°C). Natomiast w przypadku asfaltu o zawartości elastomeru 3%SBS stanowiącego bazę

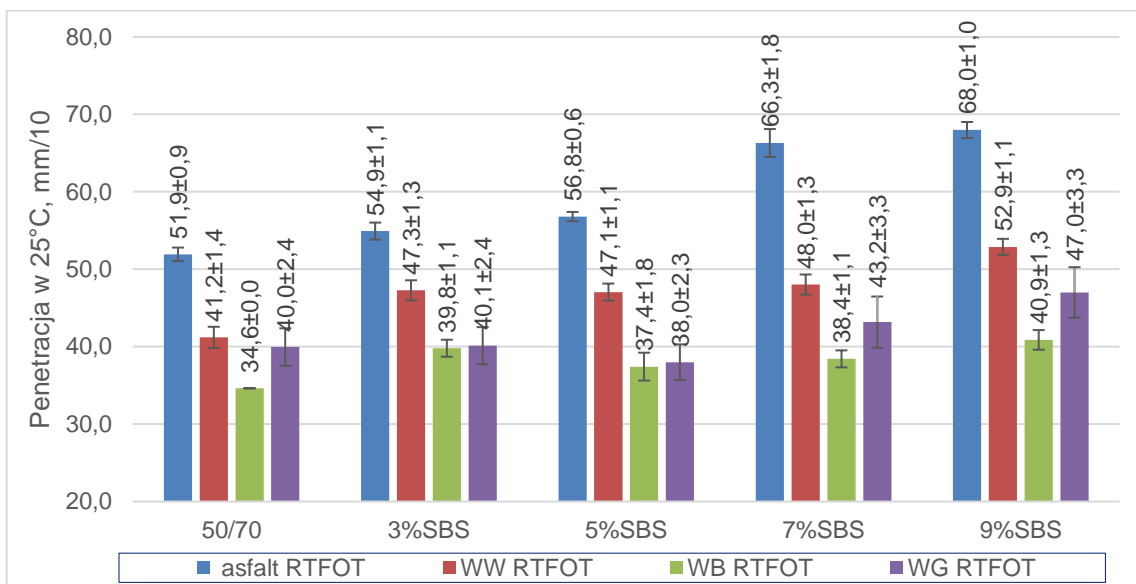
analizowanych mastyksów, zaobserwowano największy wpływ wypełniaczy mineralnych na usztywnienie mastyksu zarówno przed, jak i po starzeniu metodą RTFOT. W tym przypadku tylko mastyks 3%SBS+WW zarówno przed jak i po starzeniu RTFOT spełnia wymagania WT-1, tzn. $\Delta T_{R\&B} < 25^{\circ}\text{C}$. Może to wynikać z dużej różnicy wartości T_{PiK} występującej pomiędzy asfaltem bazowym, a badanymi mastyksami. W przypadku asfaltów 5%SBS i o większej zawartości elastomeru SBS zauważono wyraźny przyrost temperatury mięknięcia asfaltu wyjściowego, co w konsekwencji spowodowało mniejsze przyrosty ΔT_{PiK} . W kilku przypadkach odnotowano przyrost temperatury mięknięcia poniżej 8°C , co może być związane ze zbyt małym usztywnieniem mastyksu, z reguły skorelowanym z małą zawartością wolnych przestrzeni w danym wypełniaczu. Tylko wypełniacz bazaltowy spełnia wymagania WT-1, jedynie w przypadku mastyksu z asfaltem 3%SBS przekracza $\Delta T_{R\&B} > 25^{\circ}\text{C}$, czyli w tym przypadku oddziałuje usztywniająco na mastyks.

- **Penetracja w 25°C**

Penetrację Pen_{25} badanych asfaltów modyfikowanych oraz mastyksów oznaczono zgodnie z normą PN-EN 1426, zgodnie z opisem metodyki pomiarowej w punkcie 5.2 w temperaturze $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Oznaczenia penetracji wykonano w szklanych naczyniach penetracyjnych, wykonując po 7 pomiarów dla każdego z badanych asfaltów i mastyksów. Na rys. 6.5 oraz 6.6 przedstawiono wyniki pomiarów penetracji w postaci przedziału $(\bar{x} \pm U(x))$, przy poziomie ufności $P_u = 95\%$ odpowiednio dla asfaltów i mastyksów, przed starzeniem i po starzeniu technologicznym metodą RTFOT.



Rys. 6.5. Wyniki oznaczeń penetracji w temperaturze 25°C badanych asfaltów i mastyksów



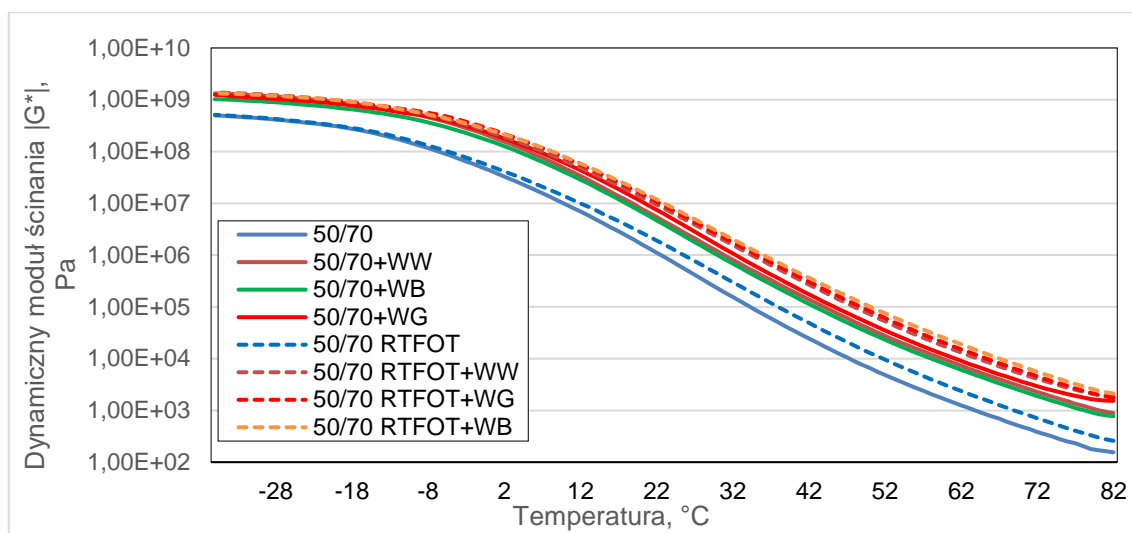
Rys. 6.6. Wyniki oznaczeń penetracji w temperaturze 25°C badanych asfaltów i mastyksów po starzeniu metodą RTFOT

Penetracja jest parametrem za pomocą którego klasyfikujemy się asfalty ponaftowe zgodnie z PN-EN 12591. Dodatkowo wprowadzając temperaturę mięknięcia T_{PIK} można dokonać klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami zgodnie z PN-EN 14023. Badane asfalty niepoddane starzeniu osiągnęły wartości penetracji w przedziale od 67,5 mm/10 dla asfaltu 50/70 do 76,8 mm/10 dla 9%SBS. Po starzeniu technologicznym metodą RTFOT asfalty istotnie zmieniły twardość, tj. wartość penetracji zmniejszyła się o 15,6 mm/10 dla asfaltu

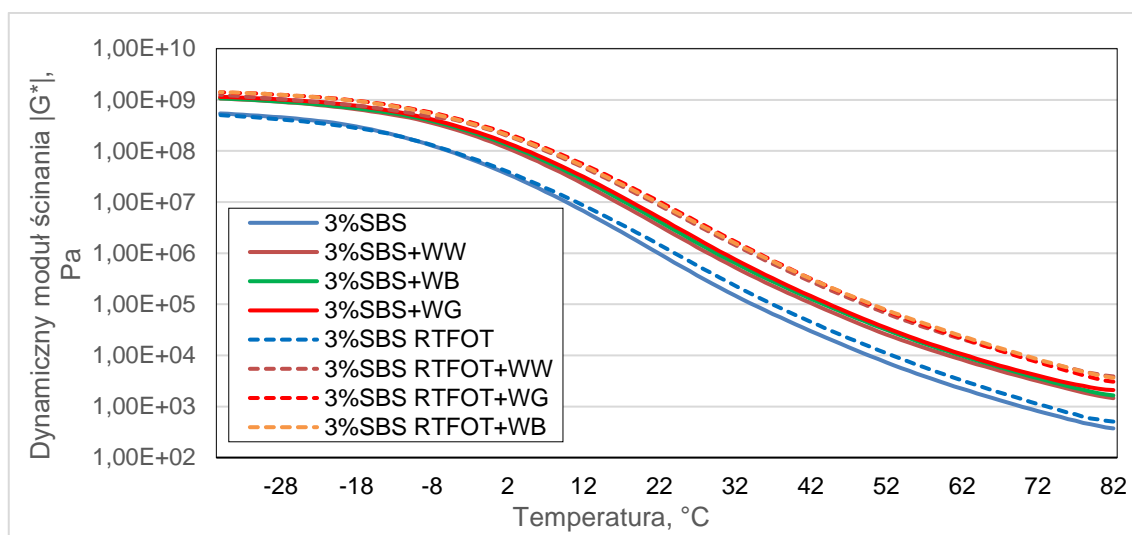
50/70 oraz 8,8 mm/10 dla 9%SBS. Największą różnicę w penetracji przed i po starzeniu wśród asfaltów odnotowano dla asfaltu 3%SBS, tj. 17,3 mm/10. Analizując wyniki penetracji dla badanych mastyksów zauważono, iż największy wpływ na usztywnienie asfaltu wykazał wypełniacz bazaltowy (jeden mastyks 5%SBS+WB stanowi wyjątek), najmniejsze oddziaływanie usztywniające zaobserwowano dla powszechnie używanego wypełniacza wapiennego. Analizując wartości penetracji przedstawione na rys. 6.5 oraz 6.6 można zauważyć, że im większa jest zawartość elastomeru SBS w badanym asfalcie, tym większe wartości penetracji obserwujemy. Podobne zjawisko można zaobserwować, analizując wyniki mastyksów. Im większa zawartość elastomeru w badanym mastyksie, tym efekt usztywnienia jest mniejszy.

6.3. Badania w reometrze dynamicznego ścinania DSR

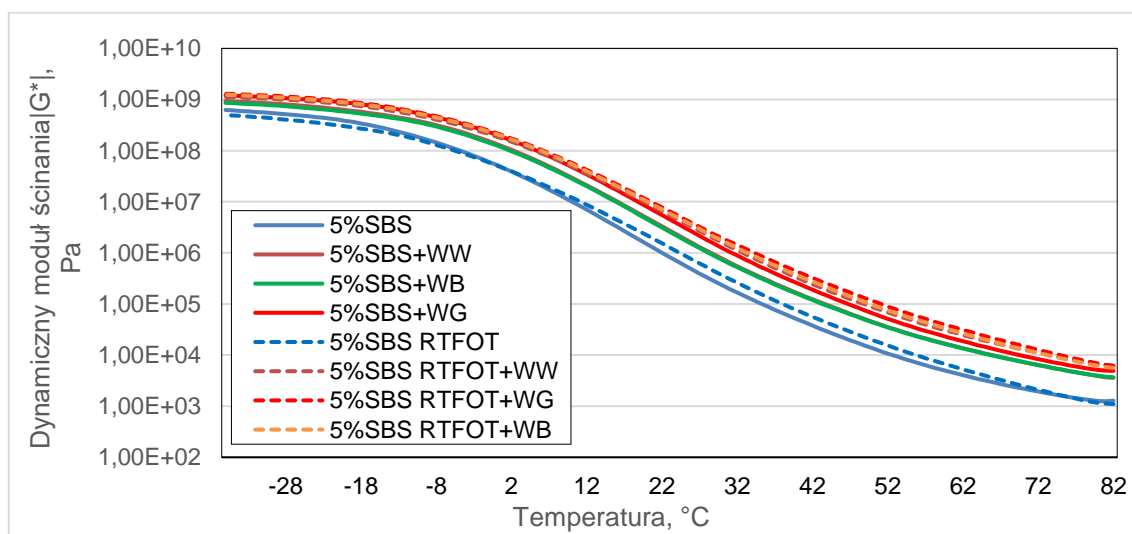
Cechy reologiczne analizowanych lepiszczy oraz mastyksów asfaltowych określono poprzez badania przy użyciu reometru dynamicznego ścinania (DSR), zgodnie z metodyką opisaną w 5.2. Rys. 6.7-6.11 przedstawiają zależność dynamicznego modułu ścinania od temperatury w tzw. zakresie temperatur eksploatacyjnych tj. od -36°C do 82°C oznaczonych przy wymuszeniu kinetycznym sinusoidalnym przy stałej częstotliwości drgań $\omega = 10 \text{ rad/s}$. Właściwości reologiczne asfaltu jako materiału lepkosprężystego zależą od temperatury oraz zastosowanego obciążenia. Oznaczenie dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$ oraz kąta przesunięcia fazowego δ umożliwia dokonanie oceny zakresu lepkosprężystego badanych lepiszczy i mastyksów asfaltowych. Chcąc uniknąć powstawania odkształceń trwałych w nawierzchniach asfaltowych w wysokich temperaturach eksploatacyjnych występujących w okresie letnim zalecana jest większa wartość dynamicznego modułu ścinania oraz mniejszy kąt przesunięcia fazowego, tzn. badany materiał powinien mieć większy udział części sprężystej [Radziszewski, 2017].



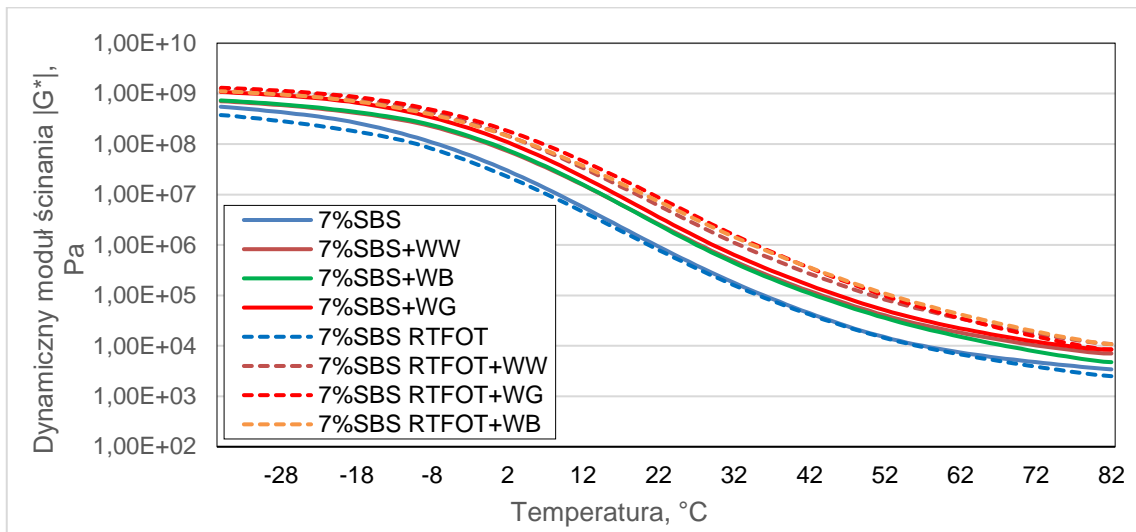
Rys. 6.7. Zależność dynamicznego modułu ścinania od temperatury dla asfaltu 50/70



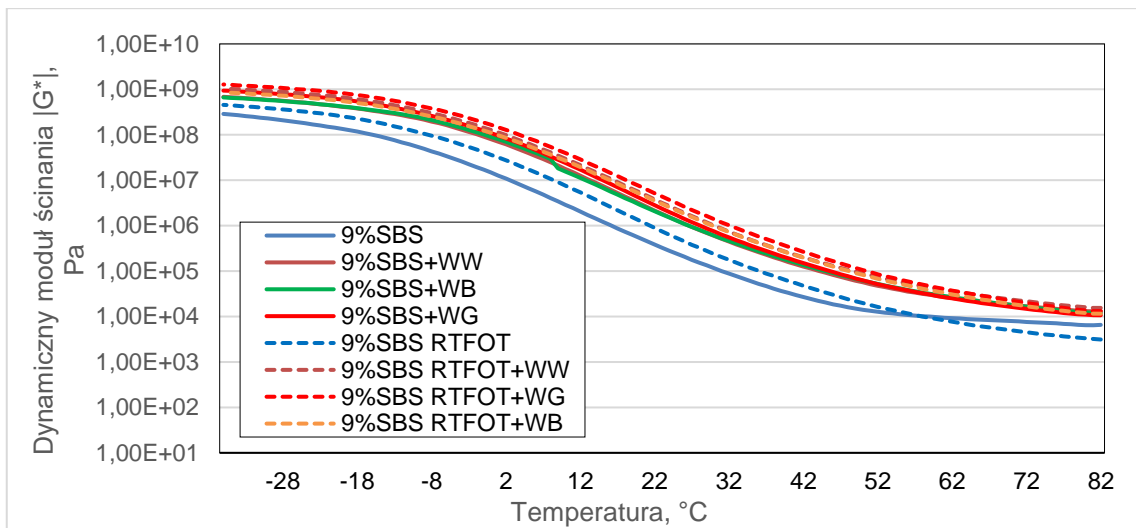
Rys. 6.8. Zależność dynamicznego modułu ścinania od temperatury dla asfaltu 3%SBS



Rys. 6.9. Zależność dynamicznego modułu ścinania od temperatury dla asfaltu 5%SBS



Rys. 6.10. Zależność dynamicznego modułu ścinania od temperatury dla asfaltu 5%SBS

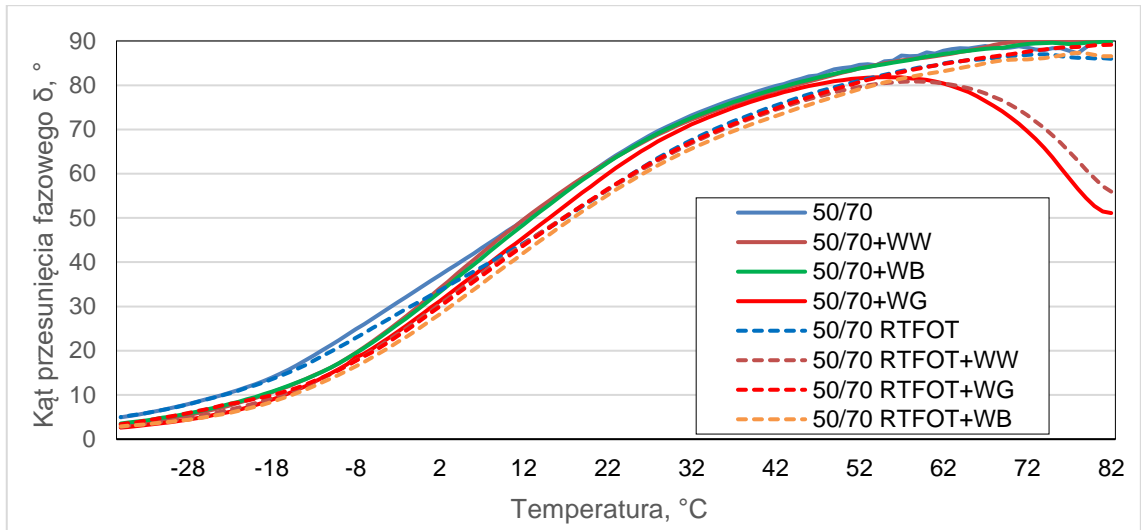


Rys. 6.11. Zależność dynamicznego modułu ścinania od temperatury dla asfaltu 5%SBS

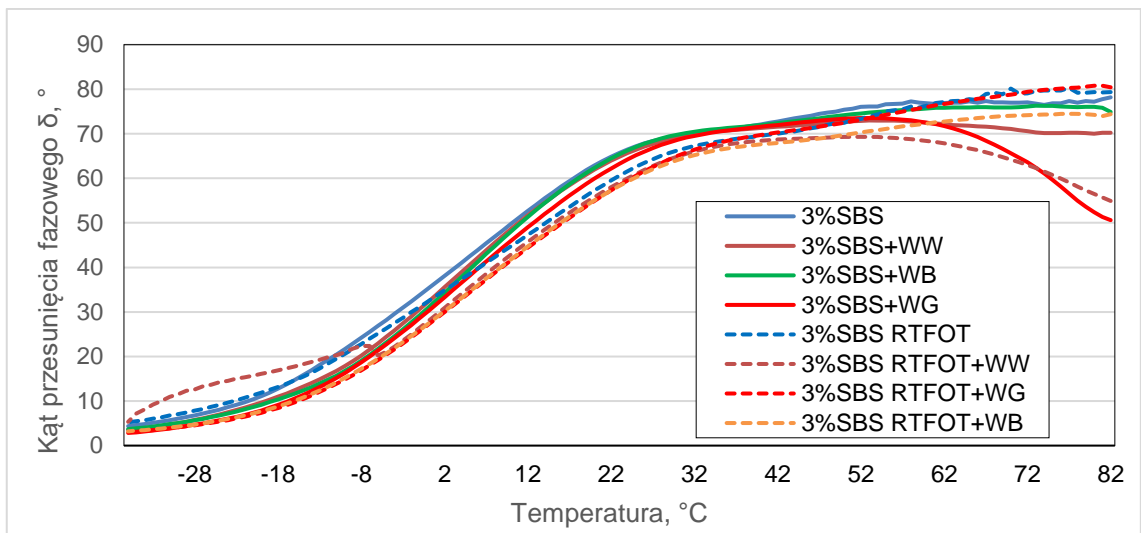
Wyniki zależności dynamicznego modułu ścinania od temperatury na przestawiono na rys. 6.7 – 6.11 w skali półlogarytmicznej. W każdym analizowanym przypadku przyrost temperatury badania powoduje zmniejszenie wartości dynamicznego modułu ścinania. Obecność wypełniacza w każdym przypadku wpłynęła na charakterystykę lepkosprężystą mastyksów. Największe oddziaływanie usztywniające można odnotować dla wypełniacza granitowego, zaś rezultaty oznaczenia dynamicznego modułu ścinania dla wypełniacza bazaltowego i wapiennego niemal się pokrywają. Świadczy to o pozytywnym wpływie wypełniacza bazaltowego na właściwości reologiczne mastyksu

w szerokim zakresie temperatur, obejmujących swym zakresem temperatur eksploatacyjne nawierzchni.

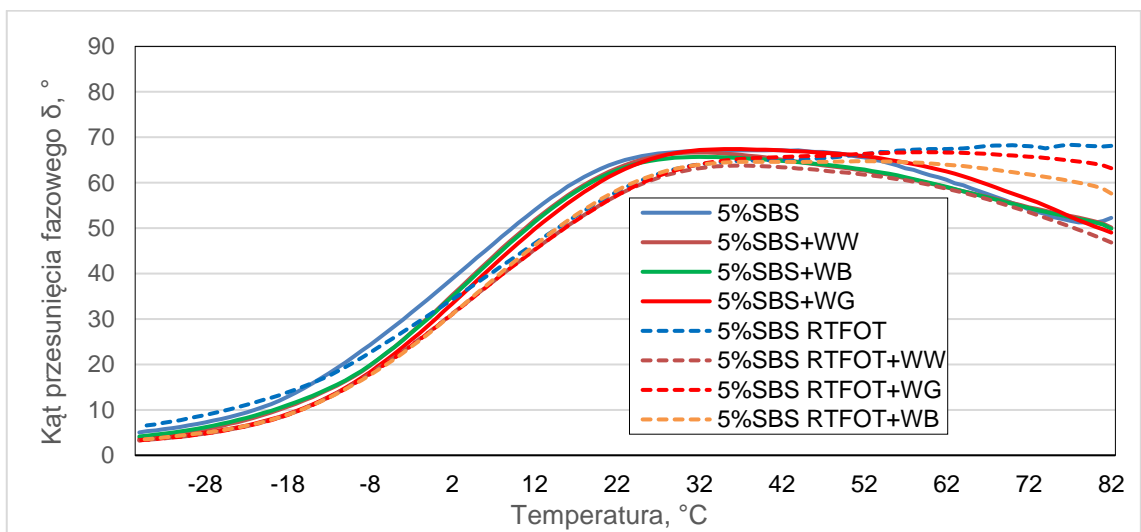
Na rys. 6.12 – 6.16 przedstawiono zależność kąta przesunięcia fazowego δ od temperatury. Pierwszym spostrzeżeniem jest fakt, iż w zakresie niskich temperatur badania wartość kąta przesunięcia fazowego dąży asymptotycznie do zbliżonej wartości dla mastyksu (każdego analizowanego) i asfaltu bazowego. Może to być spowodowane faktem, że sztywność asfaltu jest dominująca w niskich temperaturach i tym sposobem rzutuje na właściwości reologiczne mastyksu [Mazurek, 2019A]. W temperaturze -36°C uzyskano wartości kąta przesunięcia fazowego poniżej 10° (tylko dla 9%SBS jest to $12,8^{\circ}$). Dla wszystkich badanych materiałów zatem można wnioskować, iż uzyskują one właściwości zbliżone do ciał sprężystych. Natomiast w zakresie wysokich temperatur (powyżej 40°C) zaobserwowano duże zróżnicowanie kąta przesunięcia fazowego. Można zauważyć, iż zwiększając zawartość kopolimeru SBS, w zakresie wysokich temperatur w znacznym stopniu zmniejsza się wartość kąta przesunięcia fazowego. Najbardziej jest to widoczne dla asfaltu 9%SBS, który w temperaturze 82°C osiągnął $\delta=19,9^{\circ}$; jednak wartość maksymalną równą $56,7^{\circ}$ osiągnął w temperaturze 29°C . Podobną zależność można odnotować dla mastyksów sporządzonych z udziałem asfaltu 9%SBS, gdyż w zakresie wysokich temperatur osiągają one δ od $28,8^{\circ}$ dla mastyksu 9%SBS+WW do $40,1^{\circ}$ dla mastyksu 9%SBS RTFOT+WG. Zatem można wnioskować iż wykazują właściwości lepkosprężyste, a dominująca jest składowa sprężysta. Dodatkowo na zmniejszenie wartości kąta fazowego w mastyksach pozytywnie wpływa modyfikacja kopolimerem SBS.



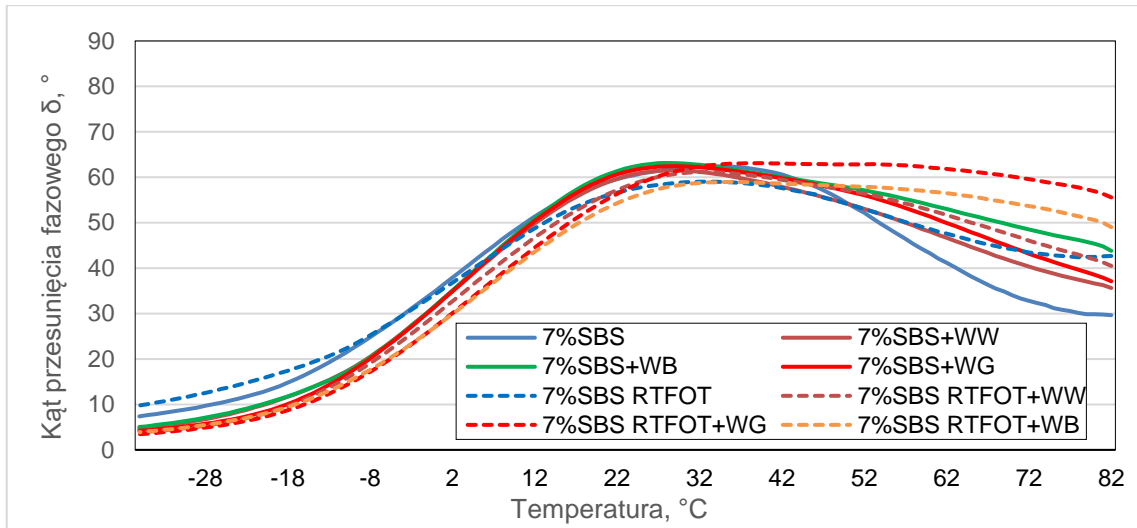
Rys. 6.12. Zależność kąta przesunięcia fazowego od temperatury dla asfaltu 50/70



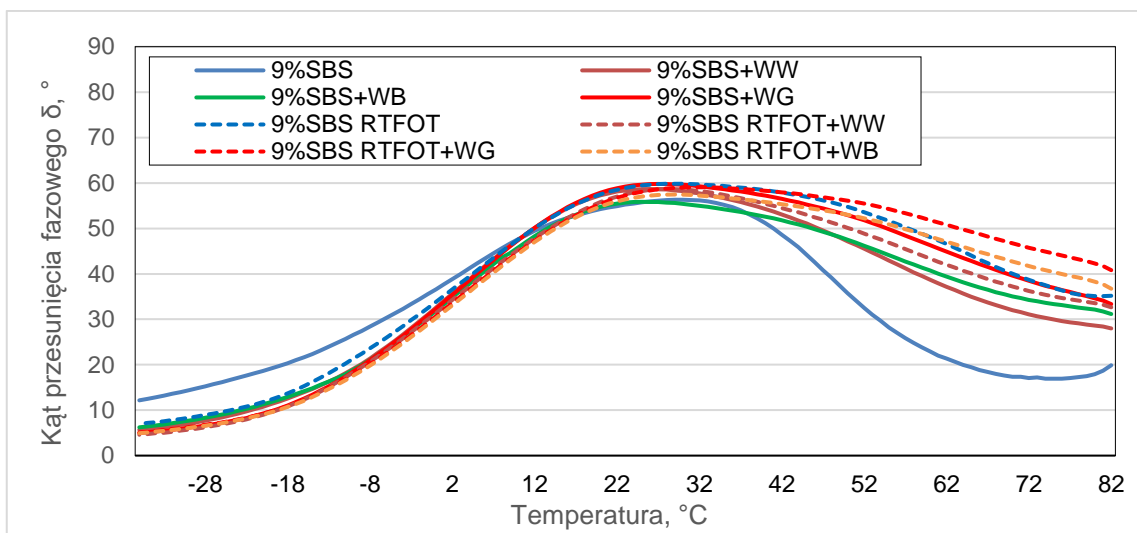
Rys. 6.13. Zależność kąta przesunięcia fazowego od temperatury dla asfaltu 3%SBS



Rys. 6.14. Zależność kąta przesunięcia fazowego od temperatury dla asfaltu 5%SBS

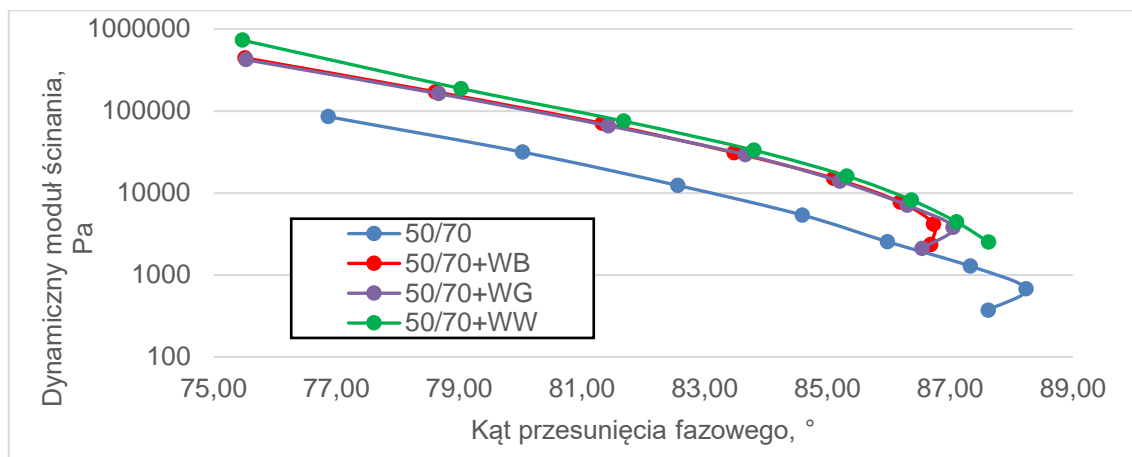


Rys. 6.15. Zależność kąta przesunięcia fazowego od temperatury dla asfaltu 7%SBS

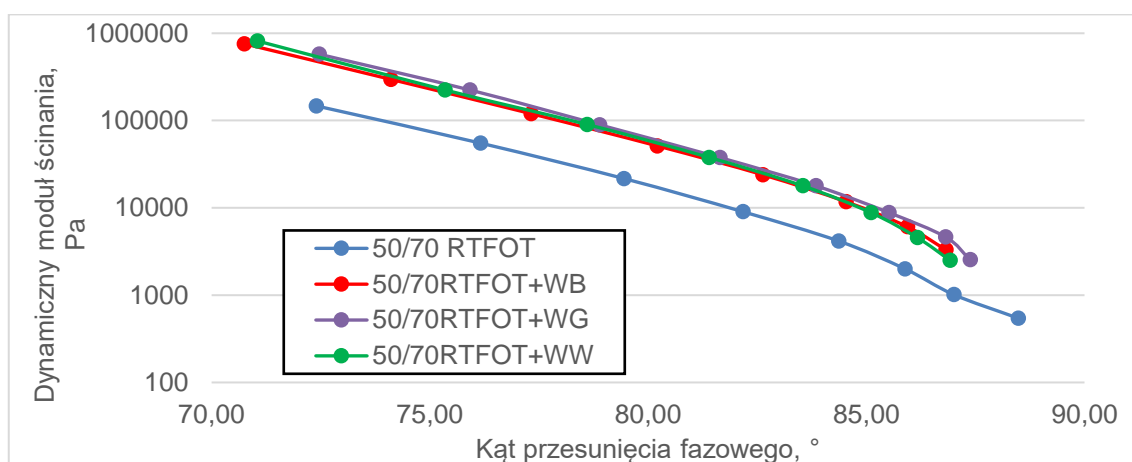


Rys. 6.16. Zależność kąta przesunięcia fazowego od temperatury dla asfaltu 9%SBS

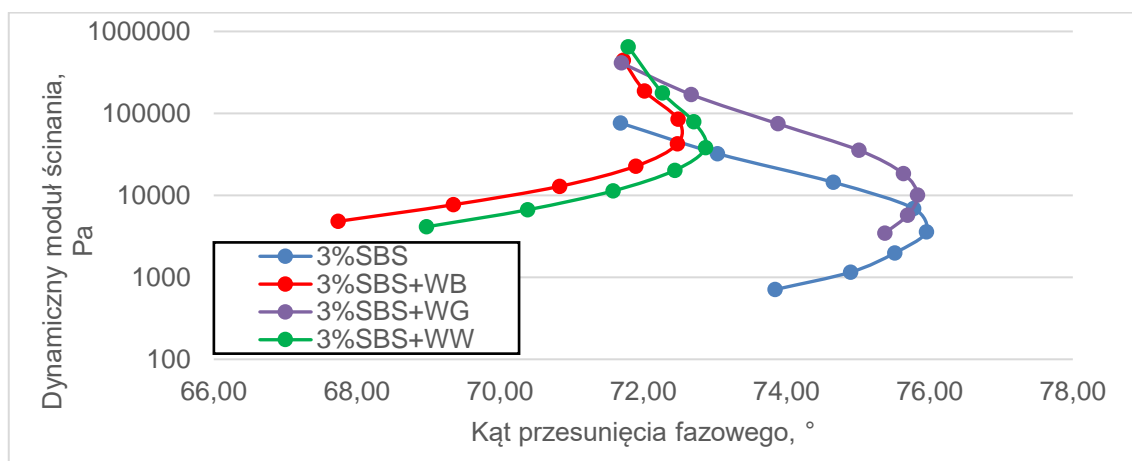
Na rys. 6.17 – 6.26 przedstawiono zależność dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$ od kąta przesunięcia fazowego δ w postaci krzywych Blacka (ang. *Black diagrams*) [Airey, 2002]. Analizując wykresy krzywych Blacka bardzo istotne jest dobranie odpowiedniego zestawu pomiarowego planując program badań. Airey G. w publikacji [Airey, 2002] dokonał bardzo wnikliwej analizy zależności właściwości reologicznych oznaczonych przy użyciu reometru DSR stosując różne rozmiary wrzecion przy tych samych warunkach pomiarowych. Zauważono istotne różnice w wynikach $|G^*|$ oraz δ przy zastosowaniu tej samej temperatury pomiaru oraz częstotliwości, natomiast zmienne były średnice wrzecion (8 oraz 25 mm).



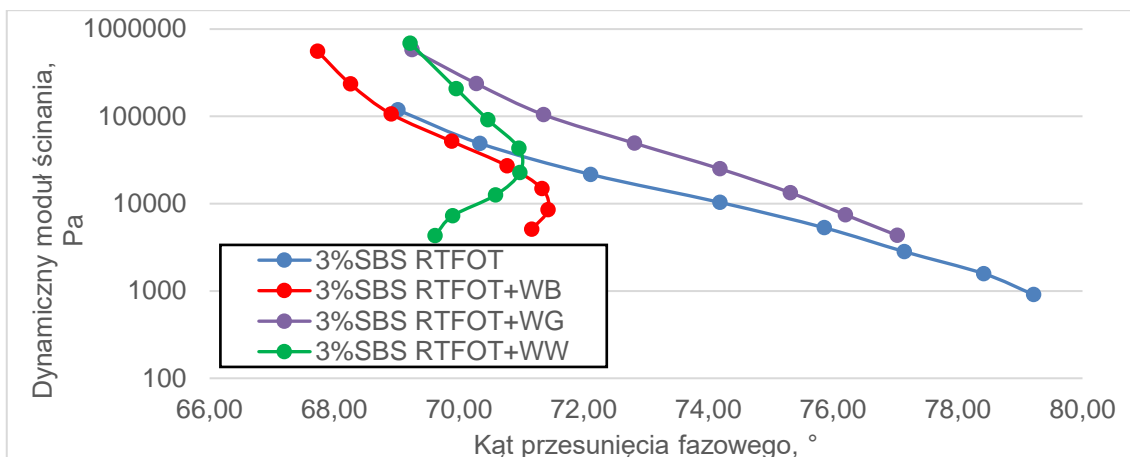
Rys. 6.17. Wykres Blacka dla asfaltu 50/70 oraz mastyksów przed starzeniem



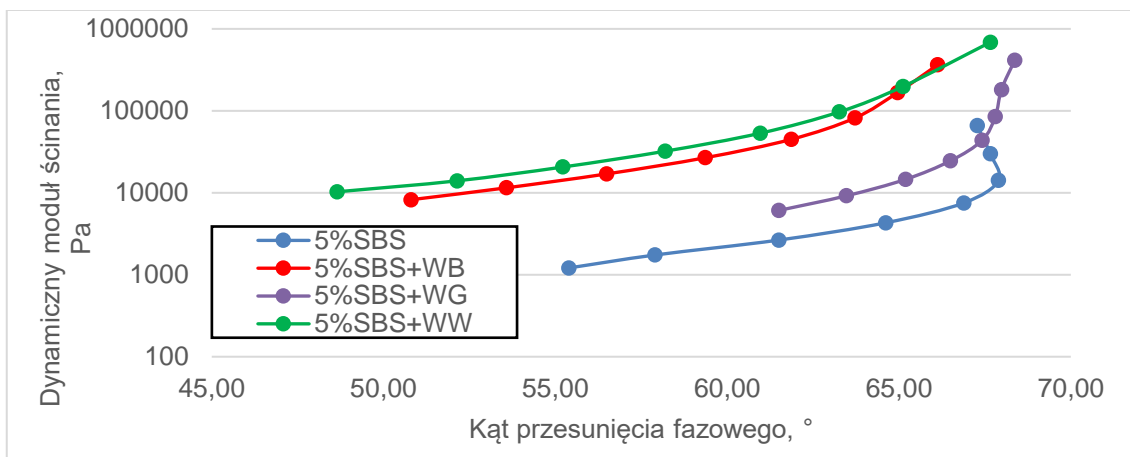
Rys. 6.18. Wykres Blacka dla asfaltu 50/70 oraz mastyksów po starzeniu metodą RTFOT



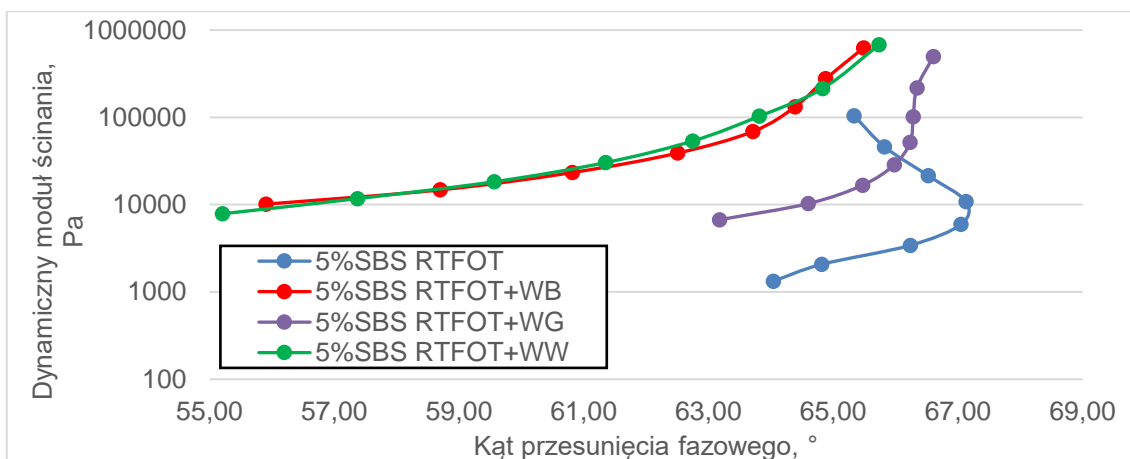
Rys.6.19. Wykres Blacka dla asfaltu 3%SBS oraz mastyksów przed starzeniem



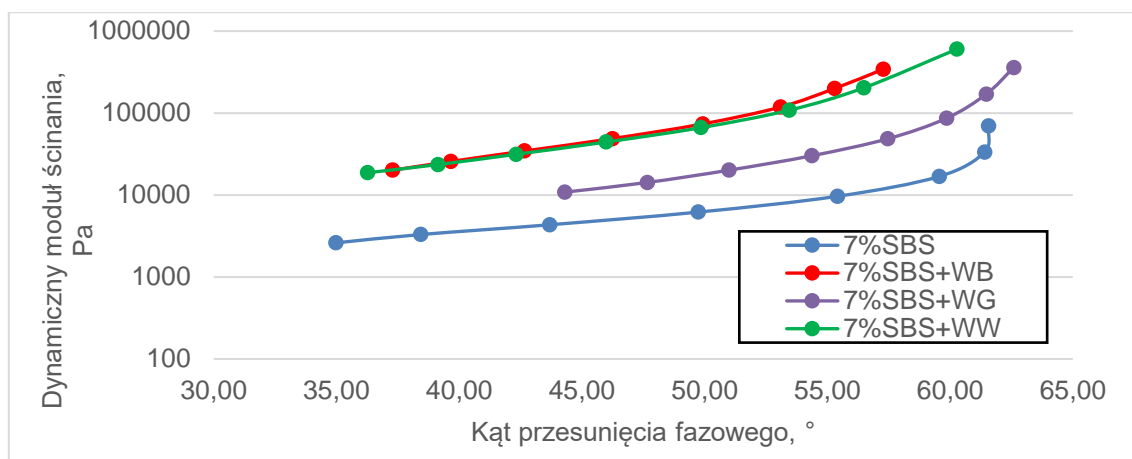
Rys. 6.20. Wykres Blacka dla asfaltu 3%SBS oraz mastyksów po starzeniu metodą RTFOT



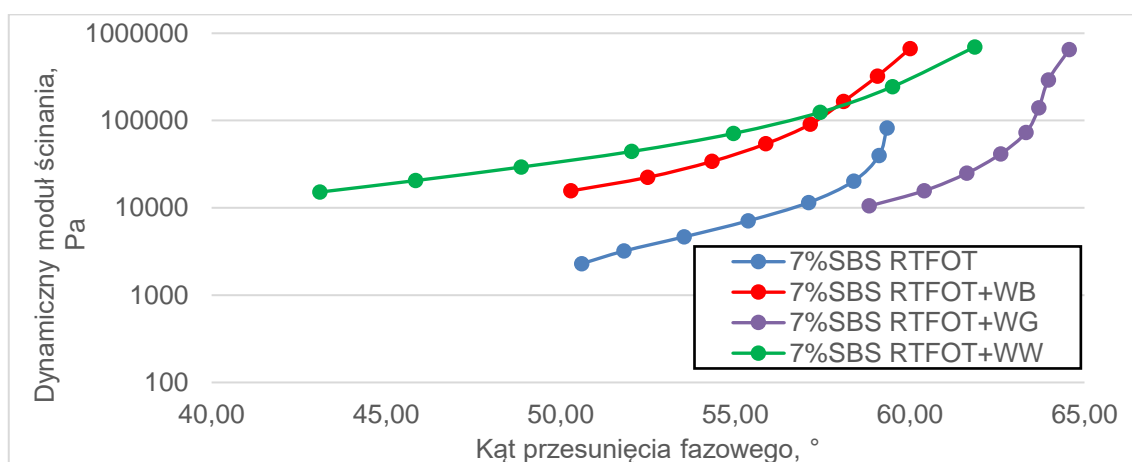
Rys. 6.21. Wykres Blacka dla asfaltu 5%SBS oraz mastyksów przed starzeniem



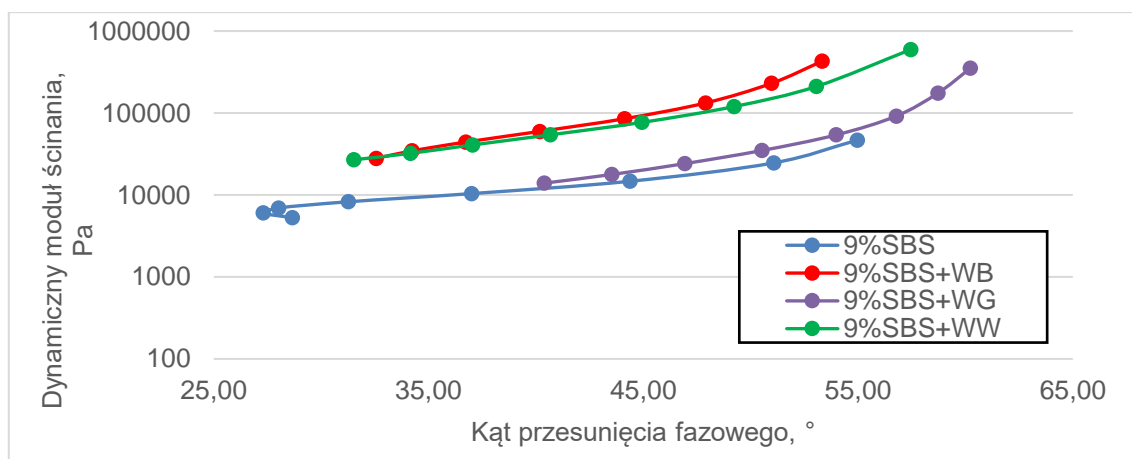
Rys. 6.22. Wykres Blacka dla asfaltu 5%SBS oraz mastyksów po starzeniu metodą RTFOT



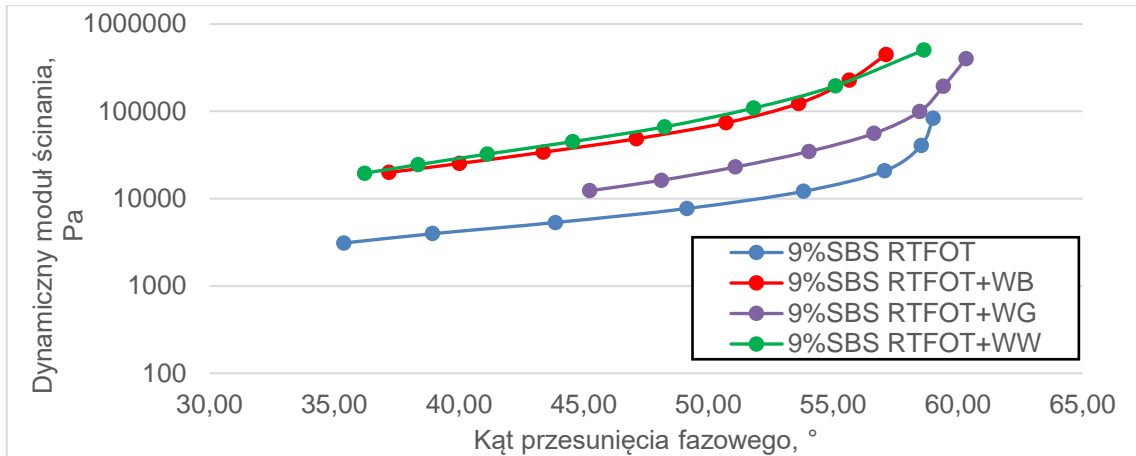
Rys. 6.23. Wykres Blacka dla asfaltu 7%SBS oraz mastyków przed starzeniem



Rys. 6.24. Wykres Blacka dla asfaltu 7%SBS oraz mastyków po starzeniu metodą RTFOT



Rys. 6.25. Wykres Blacka dla asfaltu 9%SBS oraz mastyków przed starzeniem



Rys. 6.26. Wykres Blacka dla asfaltu 9%SBS oraz mastyksów po starzeniu metodą RTFOT

Można zauważyć, iż dla asfaltów 50/70 oraz niskomodyfikowanych (3%SBS) kopolimerem SBS uzyskano zależność, że im większe wartości dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$, tym mniejsze wartości kąta przesunięcia fazowego δ . Podobne zależności można zaobserwować dla mastyksów na bazie tych asfaltów. Natomiast zwiększając zawartość kopolimeru SBS w asfaltach jak i mastyksach przed i po starzeniu RTFOT można dostrzec odwrotną zależność, tzn. im mniejsze wartości dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$ tym uzyskujemy mniejsze wartości kąta przesunięcia fazowego δ . Natomiast analizując szczegółowo badane mastyksy, można zauważyć na podstawie rys. 6.19 – 6.26, że wartości $|G^*|$ zostały w przesunięte w lewą stronę dążąc do niższych wartości kąta przesunięcia fazowego w przypadku asfaltów i mastyksów o zawartości do 5% kopolimeru SBS. Natomiast w przypadku asfaltów modyfikowanych 7%SBS i 9%SBS zaobserwowano zbliżone wartości kąta przesunięcia fazowego, przy czym odnotowano zwiększenie wartości dynamicznego modułu ścinania w mastyksach. Wypełniacz wapienny oraz bazaltowy w mastyksach wykazują podobną charakterystykę lepkosprężystą, niezależnie od stopnia modyfikacji kopolimerem SBS, natomiast mastyks z wypełniaczem granitowym uzyskuje podobne zależności do asfaltu bazowego. Można przypuszczać, że dobór wypełniacza będzie decydował o odkształcalności MMA. Analizując wpływ wypełniaczy mineralnych na wartość dynamicznego modułu ścinania stwierdzono, że mastyksy z wypełniaczem wapiennym oraz bazaltowym odnotowały największe przesunięcie w kierunku niższych wartości kąta

przesunięcia fazowego oraz uzyskały większe wartości $|G^*|$ w stosunku do asfaltu bazowego.

Następnym etapem było badanie cyklicznego pełzania z odprężeniem, które wykonano z zastosowaniem metody MSCR (opisanej szczegółowo w punkcie 5.2), przeprowadzone przy trzech poziomach naprężeń, zaczynając od najniższego 0,1 kPa poprzez 3,2 kPa kończąc na 10,0 kPa oraz przy szerokim zakresie temperatur od 82°C do 40°C obniżając skokowo temperaturę pomiaru o 6°C. W polskich przepisach nie ma wytycznych odnoszących się do wymagań granicznych wartości parametrów J_{nr} oraz R jakie powinna uzyskać próbka mastyksu poddana badaniu metodą MSCR. W tab. 6.2. przedstawiono wymagania dotyczące parametru J_{nr} dla asfaltów w zależności od przewidywanego obciążenia ruchem. Przekładając to na warunki europejskie, dla kategorii ruchu KR7 wartości podatności nieodwracalnej powinny wynosić poniżej 0,5 kPa⁻¹. W związku z tym, że nie ma wymagań dedykowanych dla mastyksów, w analizach odniesiono się do porównań uzyskanych wyników badań z asfaltem bazowym w danym mastyksie.

Tab.6.2. Wymagania odnośnie J_{nr} dla asfaltów [zgodnie z AASHTO MP 19]

Obciążenie ruchem		$J_{nr(3,2\text{ kPa})}$, 1/kPa
S	< 70 km/h, < 10 mln osi	$J_{nr(3,2\text{ kPa})} \leq 4,0$
H	20 - 70 km/h, 10 - 30 mln osi	$J_{nr(3,2\text{ kPa})} \leq 2,0$
V	> 20 km/h, > 30 mln osi	$J_{nr(3,2\text{ kPa})} \leq 1,0$
E	< 20 km/h, > 30 mln osi	$J_{nr(3,2\text{ kPa})} \leq 0,5$

Poddając analizie uzyskane wyniki oznaczenia podatności nieodwracalnej J_{nr} w zakresie temperatur 40°C - 52°C można zauważyć, iż uzyskano wartość bliską zeru. Zgodnie z literaturą [Król i inni, 2015; D'Angelo, 2010]] w momencie uzyskania wyników $J_{nr} < 0,01$ kPa⁻¹ dla badanych asfaltów należy zastosować wyższą o 6°C temperaturę pomiaru. Szczegółowe wyniki pomiarów wykonanych metodą MSCR dla asfaltu 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z jego udziałem w tab. 6.3 – 6.6. Zestawienie szczegółowe dla wszystkich badanych materiałów zestawiono w załącznikach A.1-A.2.

Tab. 6.3. Zestawienie wyników z testu MSCR dla asfaltu 3%SBS

3%SBS		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
$R_{0,1kPa}$	%	66,01	17,47	15,86	15,10	11,92	14,48	22,91	31,81
$R_{3,2kPa}$		-10,48	-4,92	-2,98	-0,51	1,08	4,49	16,35	25,18
R_{10kPa}		-23,82	-8,27	-4,80	-1,82	-0,14	2,10	5,06	18,67
$R_{diff\ 0,1-3,2}$		115,93	121,98	125,54	104,35	89,01	60,98	28,83	20,84
$R_{diff\ 0,1-10,0}$		136,33	149,42	139,66	113,45	101,50	85,51	62,94	41,30
$R_{diff\ 3,2-10,0}$		-127,78	-52,56	-62,55	-342,24	116,11	62,81	47,99	25,84
$J_{nr\ (0,1)}$	1/kPa	0,0041	0,0113	0,0092	0,0048	0,0027	0,0011	0,0004	0,0001
$J_{nr\ (3,2)}$		0,0402	0,0232	0,0135	0,0065	0,0033	0,0013	0,0005	0,0002
$J_{nr\ (10,0)}$		0,0618	0,0249	0,0165	0,0077	0,0037	0,0015	0,0005	0,0002
$J_{nr\ diff\ 3,2-0,1}$	%	590,881	70,132	50,180	36,387	22,513	15,952	7,936	14,197
$J_{nr\ diff\ 10-0,1}$		971,495	115,128	83,072	60,498	39,103	32,130	29,367	27,337
$J_{nr\ diff\ 10-3,2}$		54,069	22,046	9,968	17,645	13,529	13,916	16,408	11,506

Tab. 6.4. Zestawienie wyników z testu MSCR dla mastyksu 3%SBS+WW

3%SBS+WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
$R_{0,1kPa}$	%	66,97	0,31	51,01	39,25	39,27	35,04	29,72	50,61
$R_{3,2kPa}$		0,92	0,48	1,64	1,19	10,86	18,96	28,76	39,69
R_{10kPa}		-1,07	-0,52	0,48	1,52	3,86	9,48	18,78	34,27
$R_{diff\ 0,1-3,2}$		97,91	73,85	93,43	86,86	72,28	45,85	25,49	21,52
$R_{diff\ 0,1-10,0}$		102,24	76,24	99,06	96,05	90,11	72,92	51,30	32,26
$R_{diff\ 3,2-10,0}$		43,07	156,42	85,72	70,00	64,43	50,01	34,72	13,68
$J_{nr\ (0,1)}$	1/kPa	0,0011	0,0012	0,0007	0,0005	0,0003	0,0001	0,0001	0,0000
$J_{nr\ (3,2)}$		0,0049	0,0027	0,0016	0,0009	0,0004	0,0001	0,0001	0,0000
$J_{nr\ (10,0)}$		0,0067	0,0033	0,0020	0,0011	0,0005	0,0002	0,0001	0,0000
$J_{nr\ diff\ 3,2-0,1}$	%	132,200	92,390	132,813	62,1544	39,5487	10,0744	2,4244	7,9834
$J_{nr\ diff\ 10-0,1}$		1250,00	129,110	188,041	93,7213	68,9488	33,6048	19,1017	16,1524
$J_{nr\ diff\ 10-3,2}$		40,5164	16,4526	17,1611	19,3310	21,0422	21,3654	19,2257	7,5650

Tab. 6.5. Zestawienie wyników z testu MSCR dla mastyksu 3%SBS+WB

3%SBS+WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
$R_{0,1kPa}$	%	78,41	49,37	47,36	57,17	52,19	48,10	25,87	54,50
$R_{3,2kPa}$		4,55	2,24	3,25	7,48	11,48	9,92	28,83	38,36
R_{10kPa}		0,00	-0,05	0,68	2,08	4,20	9,45	18,69	31,50
$R_{diff\ 0,1-3,2}$		92,12	71,60	92,72	86,92	39,02	59,37	42,04	29,52
$R_{diff\ 0,1-10,0}$		100,00	75,07	49,90	96,37	91,95	80,34	62,44	42,13
$R_{diff\ 3,2-10,0}$		100,50	76,91	84,99	72,26	63,44	51,66	35,18	17,88
$J_{nr\ (0,1)}$	1/kPa	0,0002	0,0004	0,0005	0,0003	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000
$J_{nr\ (3,2)}$		0,0017	0,0013	0,0010	0,0005	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000
$J_{nr\ (10,0)}$		0,0037	0,0021	0,0016	0,0007	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000
$J_{nr\ diff\ 3,2-0,1}$	%	551,161	165,558	138,256	72,020	30,140	1,790	8,419	6,312
$J_{nr\ diff\ 10-0,1}$		1250,00	333,505	256,873	128,596	64,078	22,543	6,311	0,166
$J_{nr\ diff\ 10-3,2}$		129,229	52,332	49,595	32,871	26,069	22,047	16,000	1,164

Tab. 6.6. Zestawienie wyników z testu MSCR dla mastyksu 3%SBS+WG

3%SBS+WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
$R_{0,1kPa}$	%	68,94	45,1578	32,8378	39,0319	37,2289	35,0771	40,0746	52,7995
$R_{3,2kPa}$		3,9081	2,0584	3,1973	5,4962	10,2521	17,0727	27,3450	38,4962
R_{10kPa}		-0,5827	-0,4460	0,5281	1,6824	3,9436	4,6645	18,9306	33,0434
$R_{diff\ 0,1-3,2}$		94,3351	71,6342	92,5661	85,9357	72,4737	51,3469	31,6945	26,4691
$R_{diff\ 0,1-10,0}$		100,846	75,7178	98,7790	95,693	89,4123	74,6866	52,7150	36,8575
$R_{diff\ 3,2-10,0}$		115,085	90,744	83,649	69,344	61,5346	47,9914	30,7731	14,1586
$J_{nr\ (0,1)}$	1/kPa	0,0008	0,0008	0,0008	0,0005	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000
$J_{nr\ (3,2)}$		0,0037	0,0027	0,0016	0,0008	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000
$J_{nr\ (10,0)}$		0,0057	0,0039	0,0019	0,0009	0,0004	0,0002	0,0001	0,0000
$J_{nr\ diff\ 3,2-0,1}$	%	323,881	178,059	87,8231	54,4572	26,8965	5,6144	2,4195	13,1526
$J_{nr\ diff\ 10-0,1}$		1250,0	289,874	131,271	85,3143	38,9212	28,5239	15,8507	21,5553
$J_{nr\ diff\ 10-3,2}$		53,3536	31,4317	23,0597	19,9695	19,7121	19,2727	15,8506	7,2461

W tab. 6.3 – 6.6 zastosowano oznaczenia tj. np. $J_{nr\ (0,1)}$ oznacza nieodwracalną podatność na pełzanie badanego materiału przy teście o naprężeniu 0,1kPa, analogiczne oznaczenia zastosowano dla R . Dodatkowo na podstawie wyników badań J_{nr} oraz R przy różnych poziomach naprężeń można obliczyć dwa parametry tj. $J_{nr\ (0,1)diff}$ oraz R_{diff} . Są one definiowane odpowiednio jako wrażliwość badanego materiału na zwiększenie obciążenia oraz jako wrażliwość

na zmiany sprężystości [Błażejowski i inni, 2021]. W opisie symbolu $J_{nr diff 3,2-0,1}$ oznacza to różnicę w nieodwracalnej podatności przy poziomach naprężeń 3,2 i 0,1 kPa. Poddając analizie wyniki oznaczenia J_{nr} uzyskane dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z jego udziałem, najmniejszą wartość podatności przy naprężeniu 10 kPa uzyskał mastyks 3%SBS+WB. Natomiast największą wartość podatności uzyskał mastyks wapienny z asfaltem modyfikowanym 3%SBS. Warto zauważyć, iż wypełniacz granitowy w tym przypadku uzyskał podatność na zbliżonym poziomie do wypełniacza wapiennego. We wszystkich mastyksach zaobserwowano przyrost podatności po zwiększeniu naprężenia, podobne zjawisko zaobserwowano w przypadku lepizczy asfaltowych. Po wykonaniu szczegółowej analizy uzyskanych wyników asfaltu modyfikowanego 3%SBS i mastyksów sporządzonych na jego udziałem w dalszej części pracy zaprezentowano wyniki J_{nr} i R przy naprężeniu 10 kPa oraz trzech zastosowanych temperaturach tj. 82°C, 76°C oraz 70°C (poniżej 70°C wartość parametru J_{nr} była bliska zeru). Wyniki przedstawiono w formie tab. 6.7, ponieważ dysproporcje między wynikami oraz w kilku przypadkach zerowe wartości J_{nr} były w formie graficznej nieczytelne.

Tab. 6.7. Wyniki badania MSCR

Badany materiał	Temperatura 82°C		Temperatura 76°C		Temperatura 70°C	
	$J_{nr (10 kPa)}$	$R_{(10 kPa)}$	$J_{nr (10 kPa)}$	$R_{(10 kPa)}$	$J_{nr (10 kPa)}$	$R_{(10 kPa)}$
	1/kPa	%	1/kPa	%	1/kPa	%
50/70	0,0881	-36,12	0,0317	-11,11	0,0211	-6,62
3%SBS	0,0620	-23,82	0,0249	-8,27	0,0170	-4,80
5%SBS	0,0370	-12,01	0,0240	-7,55	0,0110	-2,61
7%SBS	0,0090	3,82	0,0077	0,55	0,0064	2,28
9%SBS	0,0030	21,52	0,0005	49,58	0,0003	76,79
50/70 RTFOT	0,0520	-19,29	0,0251	-8,53	0,0122	-3,68
3%SBS RTFOT	0,0350	-12,18	0,0266	-9,13	0,0090	-2,00
5%SBS RTFOT	0,0178	-37,91	0,0072	-7,41	0,0111	-2,60
7%SBS RTFOT	0,0121	3,41	0,0060	3,91	0,0035	7,32

9%SBS RTFOT	0,0084	4,99	0,0045	6,22	0,0021	17,62
50/70+WW	0,0060	-1,79	0,0025	-0,71	0,0016	-0,23
3%SBS+WW	0,0070	-1,07	0,0033	-0,52	0,0020	0,48
5%SBS+WW	0,0020	4,29	0,0008	0,06	0,0006	13,99
7%SBS+WW	0,0003	33,78	0,0001	37,19	0,0001	17,38
9%SBS+WW	0,0001	49,35	0,0001	48,64	0,0000	73,01
50/70 RTFOT+WW	0,0053	-1,53	0,0021	-0,57	0,0013	-0,23
3%SBSRTFOT+WW	0,0030	0,95	0,0014	0,93	0,0010	2,56
5%SBSRTFOT+WW	0,0017	5,48	0,0011	0,81	0,0006	12,8
7%SBSRTFOT+WW	0,0003	31,63	0,0002	44,19	0,0001	66,28
9%SBSRTFOT+WW	0,0001	46,86	0,0001	61,19	0,0000	77,45
50/70+WB	0,0060	-1,74	0,0024	-0,66	0,0016	-0,33
3%SBS+WB	0,0037	0,00	0,0021	-0,05	0,0016	0,68
5%SBS+WB	0,0018	3,85	0,0011	3,19	0,0003	31,16
7%SBS+WB	0,0012	10,87	0,0004	18,74	0,0002	22,38
9%SBS+WB	0,0001	40,54	0,0001	37,81	0,0000	60,55
50/70 RTFOT+WB	0,0020	-0,43	0,0009	0,00	0,0007	0,32
3%SBSRTFOT+WB	0,0024	0,48	0,0010	1,15	0,0011	2,33
5%SBSRTFOT+WB	0,0007	10,51	0,0004	11,60	0,0002	27,42
7%SBSRTFOT+WB	0,0002	38,40	0,0000	45,80	0,0000	80,79
9%SBSRTFOT+WB	0,0001	40,86	0,0001	56,06	0,0000	73,73
50/70+WG	0,0082	-2,44	0,0032	-0,89	0,0022	-0,57
3%SBS+WG	0,0057	-0,58	0,0039	-0,44	0,0019	0,52
5%SBS+WG	0,0029	0,15	0,0014	2,10	0,0011	4,00
7%SBS+WG	0,0008	14,71	0,0006	12,58	0,0003	32,55
9%SBS+WG	0,0003	30,92	0,0002	32,33	0,0001	61,77
50/70 RTFOT+WG	0,0047	-1,35	0,0017	-0,42	0,0019	-0,44
3%SBSRTFOT+WG	0,0022	1,27	0,0010	1,49	0,0006	0,90
5%SBSRTFOT+WG	0,0012	8,36	0,0005	10,88	0,0004	23,06
7%SBSRTFOT+WG	0,0004	20,25	0,0002	34,58	0,0001	52,87
9%SBSRTFOT+WG	0,0002	35,05	0,0001	52,65	0,0000	72,08

Poddając analizie uzyskane wyniki można zauważyć, że zwiększając zawartość kopolimeru SBS w asfaltach zmniejsza się wartość podatności nieodwracalnej J_{nr} zarówno przed, jak i po starzeniu metodą RTFOT. Ponadto dodając wypełniacz mineralny do asfaltu bazowego również wpływa się na zmianę wartości J_{nr} , zmniejszając jej wartość. Trzeba podkreślić fakt, iż zwiększenie wartości naprężenia w badanej próbce od 0,1 kPa do 10 kPa powoduje również wzrost wartości podatności nieodwracalnej, natomiast w mastyksach przyrost ten jest mniejszy niż w przypadku asfaltów bazowych. Analizując asfalt modyfikowany 3%SBS zauważono przyrost wartości J_{nr} z $0,0041 \text{ kPa}^{-1}$ dla naprężenia 0,1 kPa do wartości $0,0618 \text{ kPa}^{-1}$, natomiast w przypadku mastyksów z udziałem tego asfaltu największy przyrost podatności odnotowano dla 3%SBS+WW i wyniósł on $0,0051 \text{ kPa}^{-1}$. Największą podatność nieodwracalną odnotowano dla asfaltu 50/70 w temperaturze 82°C , zaś najmniejszą dla mastyksu 9%SBS WB i WW. Wraz ze wzrostem zawartości kopolimeru w asfalcie jak i mastyksie zwiększa się wartość nawrotu sprężystego.

Dwuczynnikową analizę wariancji przeprowadzono dla wskaźnika koleinowania (ang. rutting factor) $|G^*|/\sin\delta$ oznaczonego w temperaturze 70°C w reometrze DSR. Przyjęto temperaturę 70°C jako maksymalną, jaka wystąpiła na nawierzchni drogowej w latach 90. w Polsce.

Badana cecha mierzalna: X = wskaźnik koleinowania, wyrażony jako $|G^*|/\sin\delta$ w temperaturze 70°C (umownie przyjęta jako max. temperatura jaka może wystąpić na nawierzchni drogowej)

Pomiary $|G^*|/\sin\delta$ sklasyfikowane są według dwóch niezależnych czynników systematycznych:

1. pięciopozomowego czynnika A określającego zawartość kopolimeru SBS w badanym materiale: $A_1 = 0\%$, $A_2 = 3\%$, $A_3 = 5\%$, $A_4 = 7\%$, $A_5 = 9\%$,
2. czteropozomowego czynnika B określającego badany mastyks: $B_1 = \text{asfalt bazowy}$, $B_2 = \text{mastyks wapienny}$, $B_3 = \text{mastyks bazaltowy}$, $B_4 = \text{mastyks granodiorytowy}$.

Zastosowano metodykę ANOVA, omówioną w części teoretycznej w pkt. 5.5.

Badano istotności wpływu zawartości kopolimeru SBS oraz rodzaju wypełniacza na wskaźnik koleinowania $|G^*|/\sin\delta$.

A) Przed starzeniem technologicznym

Tab. 6.8. Dane pomiarowe $|G^*|/\sin\delta$, przed starzeniem

A\B	0%	3%	5%	7%	9%
A1	400,39	990,27	2543,40	9409,91	32795,89
	491,56	1050,92	2379,41	10008,55	32942,65
	539,74	1097,01	2382,95	11463,61	18138,98
	512,46	904,01	3565,45	9093,74	23150,76
A2	3410,03	3493,15	10785,41	13554,26	39905,95
	2739,63	4652,24	8641,08	15127,98	30225,80
	3571,16	3685,87	8324,95	22139,70	37222,74
	2725,78	4146,99	8060,54	18117,50	29130,98
A3	2680,29	4651,67	9819,53	12579,89	26979,82
	2690,25	4855,16	8995,30	10517,52	19458,22
	2615,86	4441,09	7554,89	11718,73	36997,84
	2503,16	3933,00	9192,55	11412,76	41716,27
A4	4200,27	5100,47	12526,14	21781,10	26682,11
	4084,25	5642,05	11511,49	19538,31	22795,17
	3865,49	5292,29	10899,27	19627,93	24651,21
	3846,59	4957,69	10737,21	20131,58	27376,14

Hipoteza badawcza: Oznaczone wartości $|G^*|/\sin\delta$ dają podstawę do stwierdzenia interakcji pomiędzy zawartością SBS a zastosowanym wypełniaczem mineralnym.

Aby zweryfikować postawioną hipotezę badawczą zbudowana została tablica ANOVA.

Obliczenia ręczne:

a) Obliczamy poprawkę dla średniej CM oraz ogólną sumę kwadratów odchyłeń SS :

$$CM = \frac{1}{80} \left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^4 x_{ijk} \right)^2 = \frac{1}{80} (926983,94)^2 = 10741240280$$

$$SS = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^4 x_{ijk}^2 - CM = 19789442581,34 - 10741240280,0 \\ = 9048202300,99$$

Aby zweryfikować postawioną hipotezę badawczą zbudowana została tablica ANOVA.

Tab.6.9. Zestawienie sum dla analizowanego $|G^*|/\sin\delta$

Materiał badany	Zawartość kopolimeru SBS, %					Ogółem
	0%	3%	5%	7%	9%	
asfalt bazowy	2044,1	4042,2	10871,2	36975,8	107028,3	160961,6
mastyks wapienny	12246,5	15978,3	35811,9	38939,4	136485,5	269461,7
mastyks bazaltowy	10489,5	17880,9	35562,2	46228,9	125152,2	235313,8
mastyks granodiorytowy	15996,6	20992,5	45674,1	77078,9	101504,6	261246,8
ogółem	40776,90	58893,88	127919,5	229223,1	470170,5	

Stąd sumy kwadratów dla czynników A i B oraz interakcji AB :

$$SS(A) = \frac{1}{80} \sum_{i=1}^5 \left(\sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 x_{ijk} \right)^2 - CM = 3,66 \cdot 10^8$$

$$SS(B) = \frac{1}{80} \sum_{j=1}^4 \left(\sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^4 x_{ijk} \right)^2 - CM = 7,70 \cdot 10^9$$

$$SS(AB) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^5 \left(\sum_{k=1}^4 x_{ijk} \right)^2 - SS(A) - SS(B) - CM = 3,28 \cdot 10^8$$

Suma kwadratów dla błędu

$$SSE = SS - SS(A) - SS(B) - SS(AB) = 6,52 \cdot 10^8$$

Średnie kwadratów obliczamy dzieląc odpowiednie sumy kwadratów przez odpowiadającą im liczbę stopni swobody. Statystyki F obliczamy dzieląc średnie kwadraty przez średni błąd. Wyniki obliczeń zestawione są w formie tablicy 6.10.

Tab. 6.10. Zestawienie wyników obliczeń w formie ANOVA

Źródło zmienności	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	Wartość <i>p</i>	Test <i>F</i>
A	3	3,66E+08	1,22E+08	11,23	6,04E-06	2,76
B	4	7,70E+09	1,93E+09	177,31	1,66E-32	2,53
A-B interakcja	12	3,28E+08	2,74E+07	2,52	0,009352	1,92
Błąd	60	6,52E+08	1,09E+07			
Ogółem	79	9,05E+09				

Wnioski z przeprowadzonego badania:

Wyniki oznaczeń wskaźnika koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ w temperaturze 70°C w badanym układzie dwuczynnikowym dają podstawę do stwierdzenia istotności wpływu dwóch czynników (zawartość SBS oraz zastosowany wypełniacz) na zmienną $|G^*|/\sin\delta$ przed starzeniem RTFOT. W tej sytuacji nie ma potrzeby przeprowadzania testów dla czynników głównych. Ponieważ obliczone wartości poziomu istotności (wartość *p*) są mniejsze od przyjętej wartości poziomu istotności ($\alpha=0,05$) stwierdzono istotny wpływ poziomów każdego z czynników A i B na badany wskaźnik koleinowania.

B) Po starzeniu technologicznym metodą RTFOT

Drugi etap obejmował wykonanie analogicznej analizy wariancji dwuczynnikowej dla wskaźnika koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ mastyksów po starzeniu metodą RTFOT, tab. 6.11.

Tab. 6.11. Dane pomiarowe $|G^*|/\sin\delta$, po starzeniu metodą RTFOT

A\B	0%	3%	5%	7%	9%
A1	895,27	1346,94	2870,25	5672,40	8247,51
	840,32	1457,33	2832,41	6230,40	8007,84
	898,39	1666,72	2374,15	5963,12	8283,83
	927,07	1386,91	2673,23	6809,41	6365,18
A2	5259,45	10652,27	19329,99	28830,70	38283,14
	5113,47	11673,11	15855,37	26869,77	46758,76
	4845,49	10063,97	13291,42	23066,97	39527,06
	4594,46	10851,94	14416,85	29363,35	33141,75
A3	5857,40	10109,26	13837,74	16889,84	30898,81
	5461,79	8640,26	13246,81	20084,25	31276,98
	5817,45	8840,27	26467,08	16431,48	32469,73

	5818,68	9185,82	12179,51	29111,51	27579,51
A4	6877,01	11005,38	16542,73	31917,02	21134,56
	7083,22	10245,49	14796,83	24390,71	28389,64
	7722,70	10676,53	12338,07	26027,58	28123,32
	7563,61	10299,47	14972,28	27382,34	32776,67

Hipoteza badawcza: Oznaczone wartości $|G^*|/\sin\delta$ po procesie starzenia metodą RTFOT dają podstawę do stwierdzenia interakcji pomiędzy zawartością SBS a zastosowanym wypełniaczem mineralnym.

Aby zweryfikować postawioną hipotezę badawczą zbudowana została tablica ANOVA (tab. 6.12).

Tab. 6.12. Zestawienie sum dla $|G^*|/\sin\delta$ po starzeniu metodą RTFOT

Zastosowany wypełniacz	Zawartość kopolimeru SBS, %					Ogółem
	0%	3%	5%	7%	9%	
asfalt bazowy	3561,058	5657,91	10750,04	24675,33	30904,36	75548,7
mastyks wapienny	20812,87	42241,29	62893,63	108130,8	157710,7	391789,3
mastyks bazaltowy	22955,32	36775,6	65731,14	82517,09	122225	330204,2
mastyks granodiorytowy	28246,54	42226,86	58649,91	109717,6	110424,2	349265,1
ogółem	75575,78	126901,7	198024,7	325040,8	421264,3	

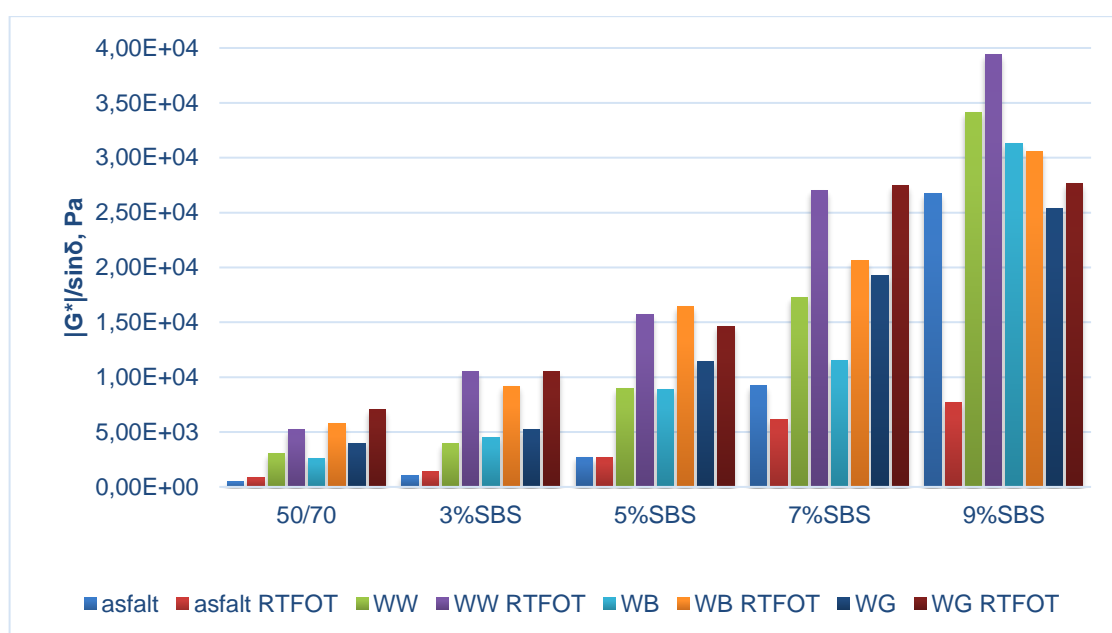
Tab.6.13. Zestawienie wyników obliczeń w formie ANOVA

Źródło zmienności	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	Wartość <i>p</i>	Test <i>F</i>
A	3	3,07E+09	1,02E+09	119,73	2,73E-25	2,76
B	4	5,07E+09	1,27E+09	148,19	2,25E-30	2,53
A-B	12	1,08E+09	90,4E+06	10,5704	8,02E-11	1,92
interakcja	60	5,13E+08	8,55E+06			
Błąd						
Ogółem	79	9,05E+09				

Wnioski z przeprowadzonego badania:

Wyniki oznaczeń wskaźnika koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ w temperaturze 70°C w badanym układzie dwuczynnikowym dają podstawę do stwierdzenia istotnej interakcji pomiędzy zawartością SBS a zastosowanym wypełniaczem. W tej sytuacji nie ma potrzeby przeprowadzania testów dla czynników głównych.

Wykazując istotną interakcję pomiędzy zawartością kopolimeru SBS, a zastosowanym wypełniaczem mineralnym w mastyksach, ze względu na analizowany wskaźnik koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ w temperaturze 70°C, na rys. 6.26. przedstawiono zbiorcze wyniki tego parametru.



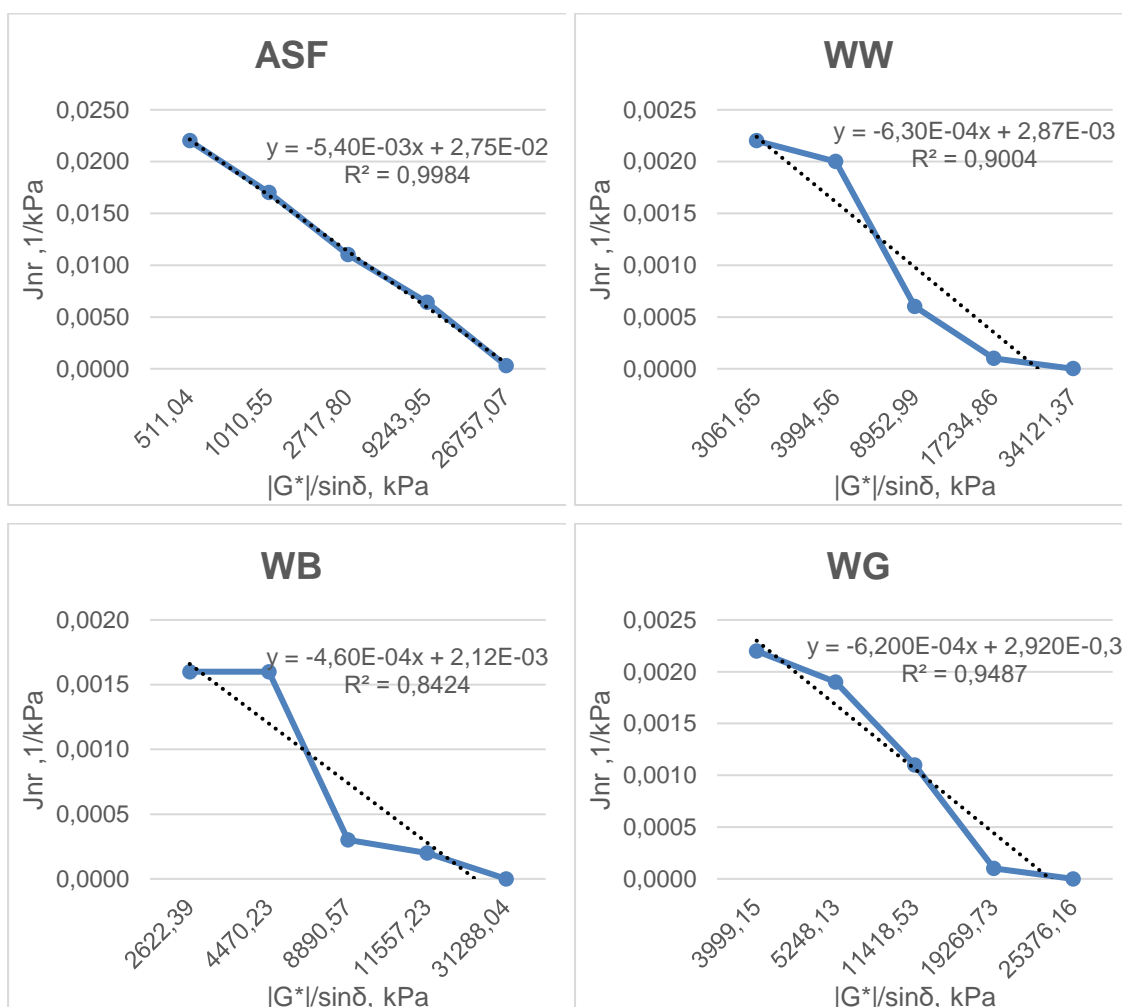
Rys. 6.26. Wskaźnik koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ badanych lepiszczy i mastyksów asfaltowych w temperaturze 70°C

Analizując rys. 6.26. można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości kopolimeru SBS w badanym asfalcie, jak i mastyksie, niepoddanemu starzeniu zwiększa się wartość wskaźnika koleinowania od 0,51 kPa dla asfaltu 50/70 do 26,75 kPa dla 9%SBS oraz wśród mastyksów od 2,62 kPa dla 50/70+WB do 34,12 kPa dla 9%SBS+WW. Również można odnotować tendencję wzrostową dla każdego z analizowanych mastyksów. Największe wartości wskaźnika $|G^*|/\sin\delta$ wśród analizowanych mastyksów osiągnął niemal w każdym przypadku wypełniacz granitowy, wyjątek stanowił 9%SBS+WG. Natomiast analizując asfalty poddane starzeniu metodą RTFOT, można zauważyć, iż przyrost zawartości kopolimeru nie skutkuje przyrostem wskaźnika koleinowania,

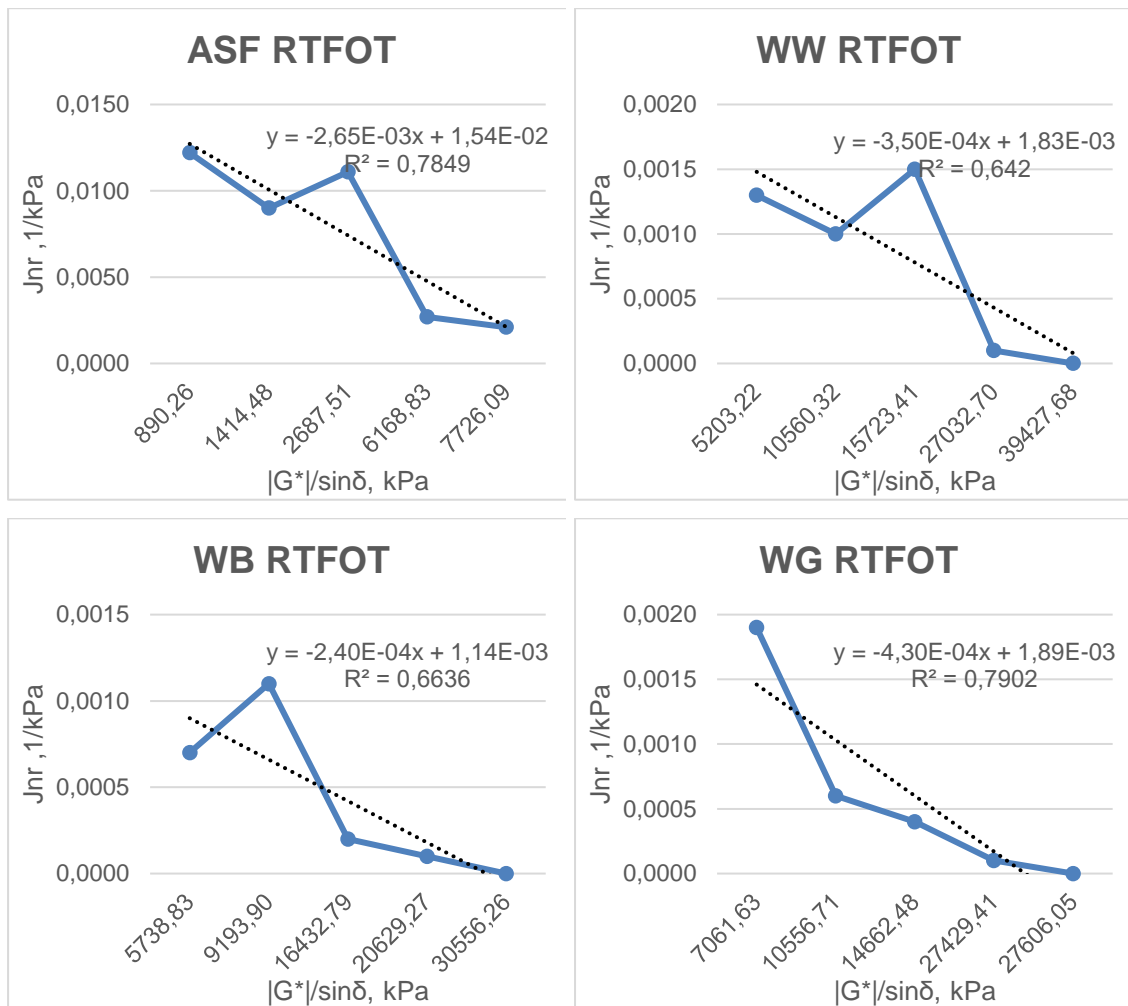
zwłaszcza jest to widoczne dla asfaltów 5%SBS, 7%SBS oraz 9%SBS. Tendencja wzrostowa jest zachowana dla analizowanych mastyksów, wyjątek stanowi mastyks asfaltowy 9%SBS+WB, gdyż po starzeniu metodą RTFOT osiągnął o wartość $|G^*|/\sin\delta$ mniejszą o 0,72 kPa w stosunku do asfaltu przed starzeniem. Podsumowując można zauważyć, iż przyrost zawartości kopolimeru SBS w mastyksie asfaltowym bardzo pozytywnie wpływa na przyrost wartości wskaźnika koleinowania mastyksów dla każdego analizowanego mastyksu. Otrzymane wartości wskaźnika koleinowania w temperaturze 70°C porównano z wymaganiami Superpave tj. $|G^*|/\sin\delta > 1,0 \text{ kPa}$ dla asfaltów niepoddanych starzeniu oraz $|G^*|/\sin\delta > 2,2 \text{ kPa}$ dla asfaltów po starzeniu metodą RTFOT. Asfalt 50/70 i 3%SBS zarówno przed jak i po starzeniu RTFOT nie spełniają tych wymagań. Pozostałe asfalty modyfikowane i mastyksy spełniają powyższe wymagania z dużym zapasem.

Bardzo często naukowcy podważają istnienie korelacji pomiędzy wskaźnikiem koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ a odpornością na powstawanie odkształceń trwałych w MMA [Domingos i Faxina, 2016; Jarafi i Babazadeh, 2016], zwłaszcza w przypadku asfaltów modyfikowanych polimerami. W roku 2010 wprowadzono normę ASTM D7405 na temat badania MSCR przy wykorzystaniu reometru DSR. Parametry, które otrzymuje się w wyniku badania to omawiane wcześniej J_{nr} i R . Wg Clopotel i Bahia [Clopotel i Bahia, 2012], w przypadku asfaltów modyfikowanych polimerami, a tym bardziej mastyksów asfaltowych, w tym badaniu można zaobserwować silną korelację pomiędzy parametrami J_{nr} i R , a odpornością na powstawanie odkształceń trwałych w MMA. W związku z tym postanowiono sprawdzić jaka jest zależność pomiędzy wartościami wskaźnika koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ i parametru J_{nr} w temperaturze 70°C dla badanych asfaltów i mastyksów przed jak i po starzeniu RTFOT. Zależność tą przedstawiono na rys. 6.27 i 6.28. W przypadku asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS niepoddanych starzeniu można zauważyć, iż jest to zależność liniowa ($R^2=0,99$); wzrost zawartości kopolimeru SBS skutkuje przyrostem wskaźnika koleinowania oraz zmniejszeniem wartości parametru J_{nr} . Również w mastyksach istnieje silna zależność tych dwóch parametrów, odpowiednio największa dla mastyksów z wypełniaczem granitowym ($R^2 = 0,95$), najmniejszą dla bazaltowego ($R^2 = 0,84$). Mniejszą zależność zaobserwowano dla asfaltów i

mastyksów po starzeniu metodą RTFOT, natomiast należy podkreślić, iż nadal obserwujemy pozytywny wpływ modyfikacji kopolimerem SBS na parametry odporności na koleinowanie otrzymanych mastyksów. W tym przypadku współczynnik determinacji R^2 największą wartość uzyskał dla mastyksów z WG ($R^2 = 0,79$), natomiast najmniejszą mastyksów zawierających wypełniacz wapienny ($R^2 = 0,64$).



Rys. 6.27. Zależność podatności nieodwracalnej J_{nr} od wskaźnika koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ dla badanych asfaltów i mastyksów niepoddanych starzeniu.

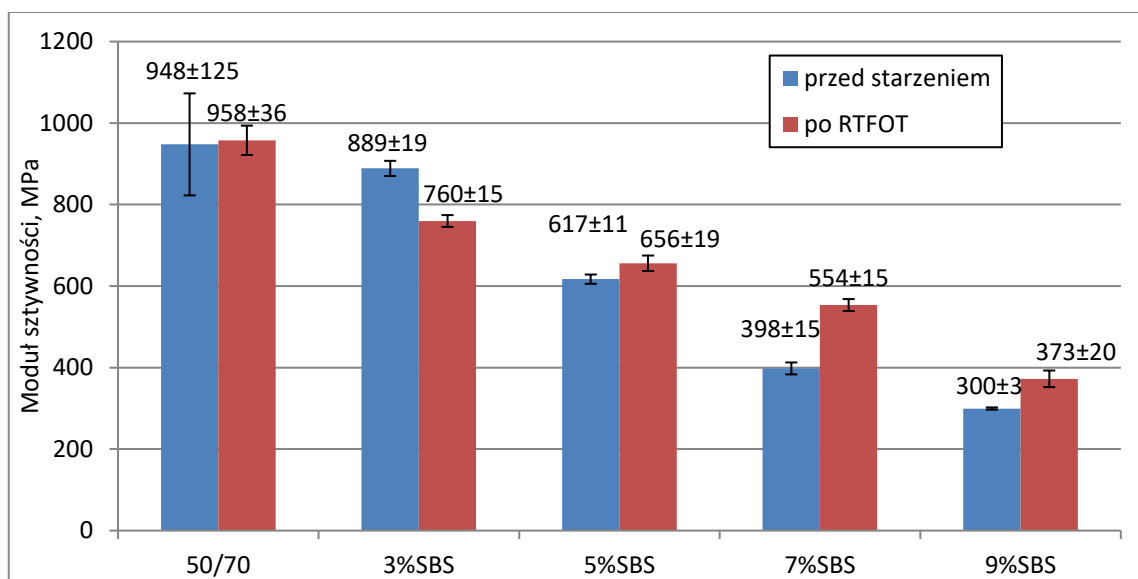


Rys. 6.28. Zależność podatności nieodwracalnej J_{nr} od wskaźnika koleinowania $|G^*|/\sin\delta$ dla badanych asfaltów i mastyksów poddanych starzeniu metodą RTFOT.

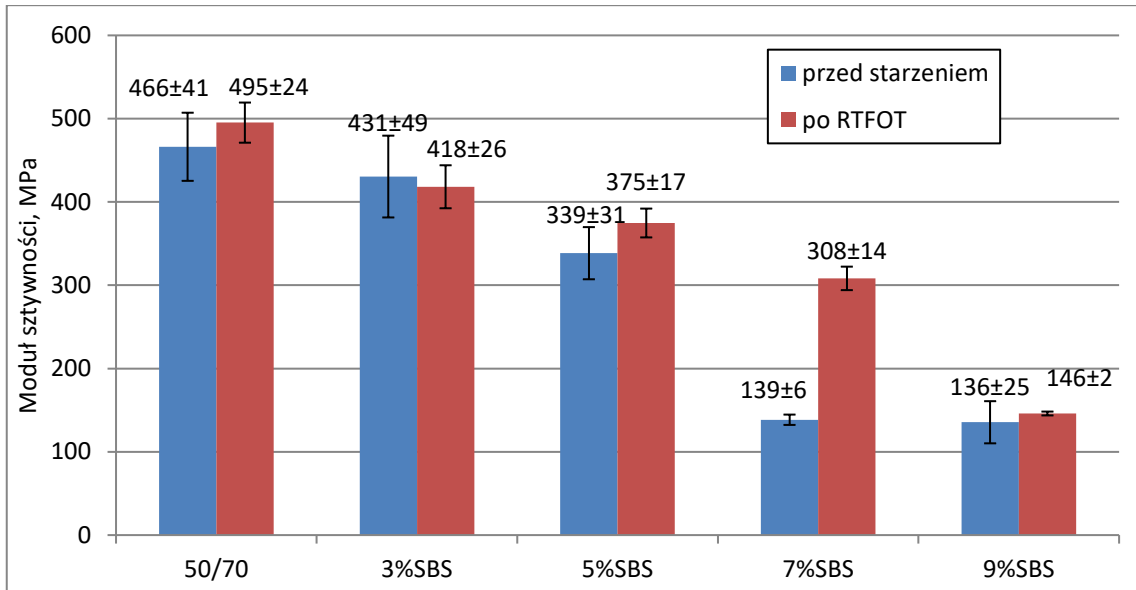
6.4. Badania w reometrze zginanej belki BBR

Oznaczenie właściwości niskotemperaturowych wykonano za pomocą metody reometru zginanej belki BBR, na podstawie normy PN-EN 14771, zgodnie z procedurą przedstawioną w pkt. 5.3. Wartości modułu sztywności wyznaczone po 60 s obciążenia siłą skupioną o stałej wartości 980 mN, obliczone zgodnie ze wzorem 5.10. zestawiono na rys. 6.29 – 6.31. Parametr m , definiowany jako gradient zmiany modułu sztywności podczas pełzania przy stałym obciążeniu, obliczony zgodnie ze wzorem 5.11, po 60 s obciążenia, przedstawiono na rys. 6.32 – 6.34. Badania w reometrze BBR przeprowadzono w trzech temperaturach: -16°C , -24°C oraz -32°C na badanych lepiszczach asfaltowych. Nie oznaczono właściwości niskotemperaturowych za pomocą

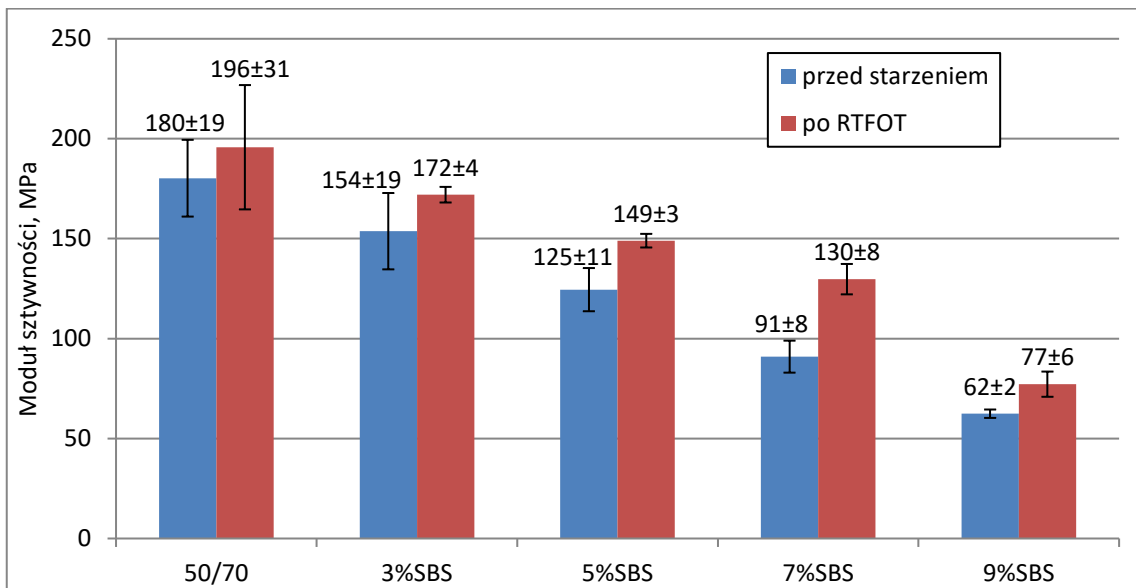
metody reometru zginanej belki BBR dla mastyksów asfaltowych, ponieważ w trakcie przygotowywania próbek, problematyczne było uzyskanie jednorodnych (pełnowymiarowych) belek mastyksowych, co przedstawiono na rysunku 5.12 c. Podjęto liczne próby zmodyfikowania procesu sporządzania belek asfaltowych poprzez zastosowanie wyższych temperatur rozgrzewania mastyksów (maksymalnie do 200°C) oraz alternatywnego zestawu form, tj. aluminiowych (tradycyjnych - opisanych w normie PN-EN 14771), jednak wyższe temperatury rozgrzewania powodowały znaczne przyspieszenie procesu starzenia mastyksu, ostatecznie belki mastyksowe również były niejednorodne lub nie w pełni zalane rozgrzanym mastyksem. Ostatecznie program badań zredukowano do asfaltów (wyjściowych i modyfikowanych) przed i po starzeniu metodą RTFOT. Wyniki oznaczeń przedstawione na wykresach w postaci średniej arytmetycznej i niepewności rozszerzonej $U(x)$ obliczonej przy poziomie ufności $P_u = 95\%$.



Rys. 6.29. Wartości modułu sztywności (dla czasu obciążenia $t = 60$ s) analizowanych asfaltów oznaczone metodą BBR w temperaturze -32°C



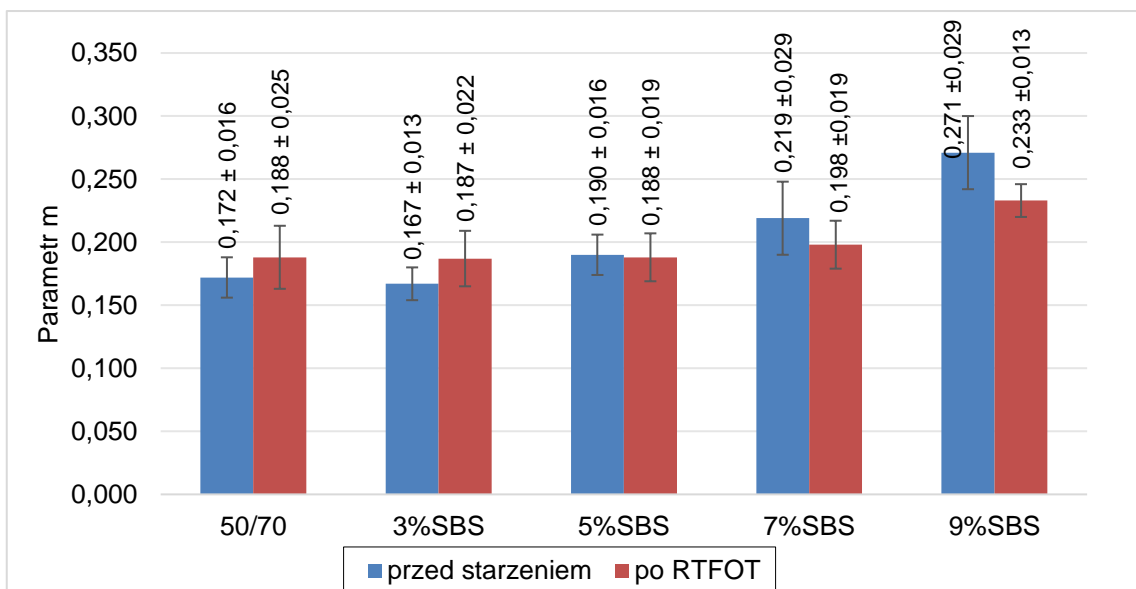
Rys. 6.30. Wartości modułu sztywności (dla czasu obciążenia $t = 60$ s) analizowanych asfaltów oznaczone metodą BBR w temperaturze -24°C



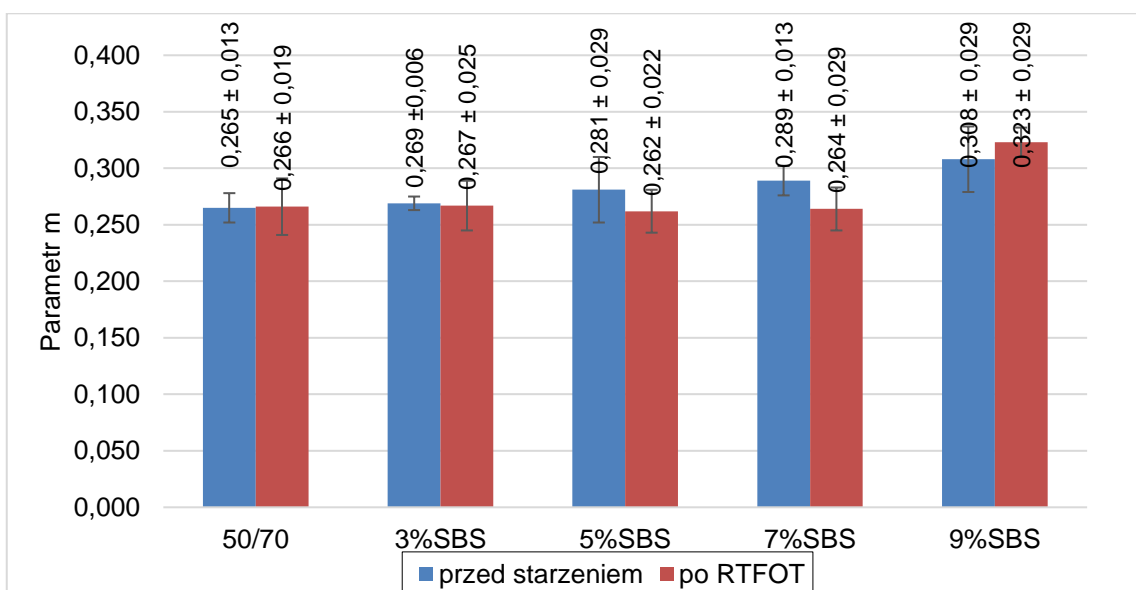
Rys. 6.31. Wartości modułu sztywności (dla czasu obciążenia $t = 60$ s) analizowanych asfaltów oznaczone metodą BBR w temperaturze -16°C

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że modyfikacja asfaltu drogowego 50/70 dodatkiem kopolimeru SBS powoduje pozytywne skutki w postaci zmniejszenia wartości modułu sztywności zarówno przed jak i po starzeniu metodą RTFOT. Duża wartość modułu sztywności może powodować wrażliwość asfaltu na pękanie niskotemperaturowe. Wytyczne Superpave wprowadzają graniczne wartości modułu sztywności ($S \leq 300\text{MPa}$) oraz parametru m ($m \geq 0,3$) dla asfaltów poddanych starzeniu RTFOT i PAV. Analizując powyższe wymagania już na poziomie starzenia technologicznego można zauważyć, iż w temperaturze badania -32°C żaden z badanych asfaltów

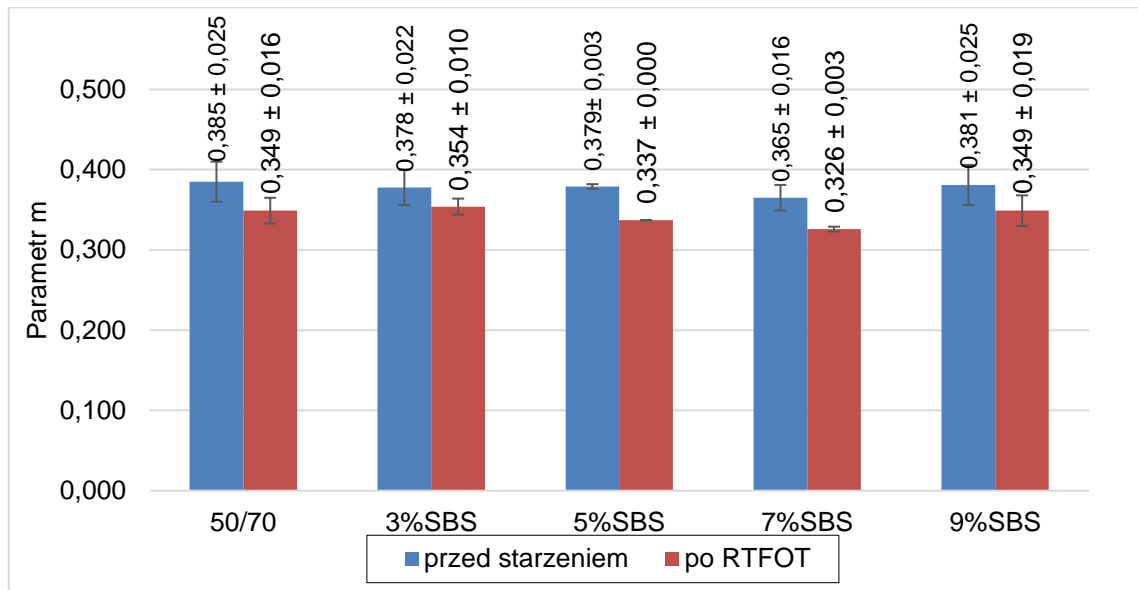
po RTFOT nie spełnia tych wymogów, tylko asfalt o zawartości 9% kopolimeru SBS przed starzeniem jest na granicy, ponieważ osiągnął wartość $S = 300 \pm 3$ MPa. W temperaturze -24°C wymagania te spełniają asfalty o zawartości kopolimeru 7% oraz 9%, zarówno przed jak i po procesie starzenia. Na poziomie temperatury pomiaru -16°C wszystkie analizowane asfalty zarówno przed jak i po starzeniu RTFOT spełniają wymagania Superpave. Dodatkowo warto zauważyć, w każdym z badanych lepiszczy asfaltowych (wyjątek stanowi asfalt 3% w temperaturze pomiaru -32°C oraz -24°C) odnotowano przyrost wartości modułu sztywności po starzeniu metodą RTFOT, największe przyrosty wartości S po starzeniu zaobserwowano dla asfaltu 7%SBS w każdej z badanych temperatur.



Rys. 6.32. Wartości parametru m (dla czasu obciążenia $t = 60$ s) analizowanych asfaltów oznaczone metodą BBR w temperaturze -32°C



Rys. 6.33. Wartości parametru m (dla czasu obciążenia $t = 60$ s) analizowanych asfaltów oznaczone metodą BBR w temperaturze -24°C



Rys. 6.34. Wartości parametru m (dla czasu obciążenia $t = 60$ s) analizowanych asfaltów oznaczone metodą BBR w temperaturze -16°C

Drugim parametrem wprowadzonym przez amerykański program badawczy SHRP jest parametr m , który zgodnie z wytycznymi w temperaturze odniesienia powinien mieć wartość powyżej 0,3. Analizując uzyskane wyniki przedstawione na rys. 6.32 - 6.34, można stwierdzić iż dopiero w najwyższej z temperatur badawczych (tj. -16°C) ten warunek został spełniony przez wszystkie badane lepiszcza asfaltowe zarówno przed jak i po starzeniu technologicznym. W temperaturze badania równej -24°C tylko asfalt o zawartości kopolimeru 9%SBS uzyskał wartość parametru $m > 0,3$. Parametr m mówi o zdolności asfaltu do relaksacji. W przypadku niskich wartości, które otrzymano w badaniu w temperaturze -32°C oraz -24°C jest to bardzo niekorzystne, głównie z punktu widzenia naprężeń rozciągających wywołanych przez gwałtowne obniżenie temperatury, może wówczas dochodzić do pęknięcia w temperaturach wyższych niż oznaczona dalszej części dysertacji temperatura krytyczna T_k .

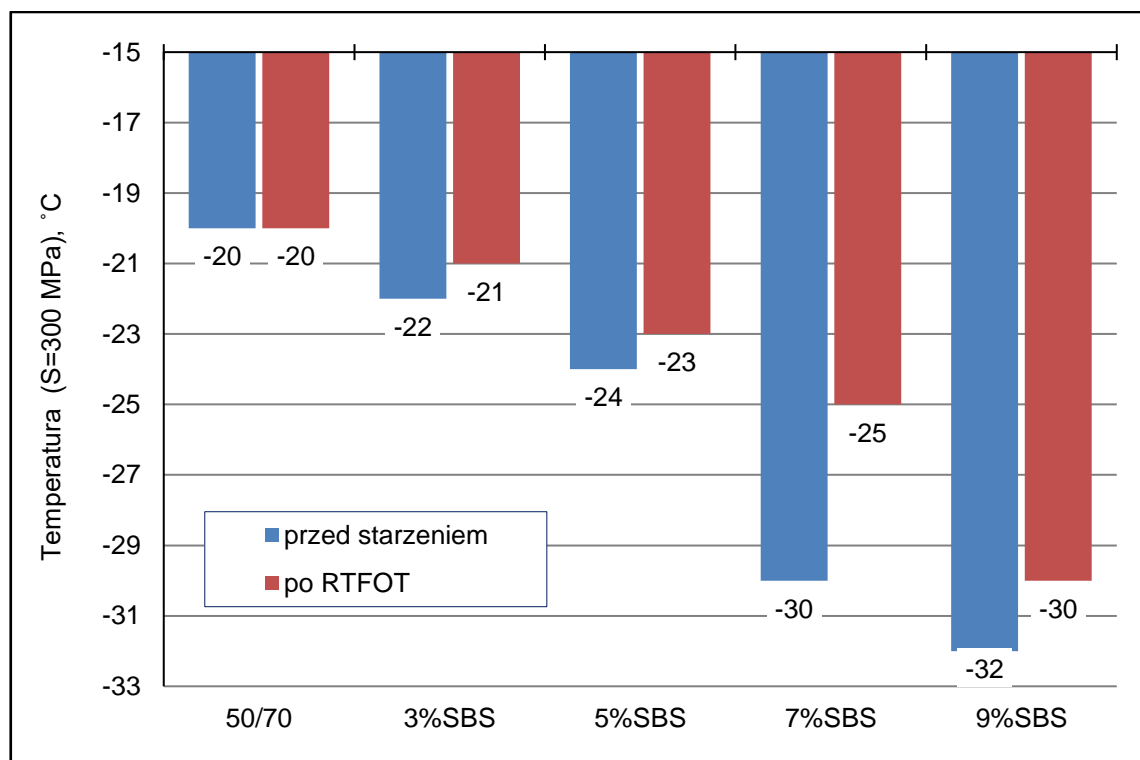
Zgodnie z programem badawczym SHRP temperaturę krytyczną należy przyjąć wyznaczając wyższą z dwóch temperatur w 60 sekundzie obciążenia, podczas gdy:

- moduł sztywności wynosi 300 MPa,
- parametr m wynosi 0,3.

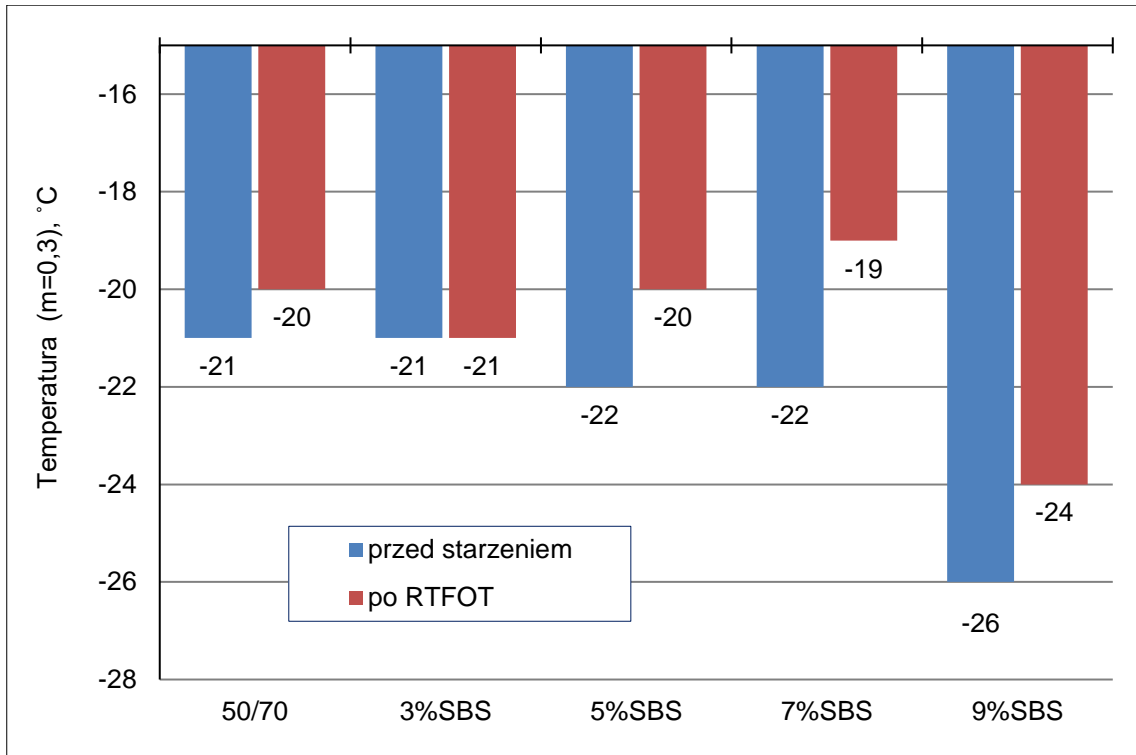
Temperaturę krytyczną wyznaczamy za pomocą wzoru [Słowik, 2013]:

$$T_k = \max(T_{S=300MPa}; T_{m=0,3}) - 10.$$

W niniejszej pracy wartości temperatury krytycznej przedstawiono na rys. 6.35 i 6.36, odpowiednio wyznaczono T_k dla modułu sztywności równego 300 MPa oraz parametru $m=0,3$. Zgodnie z informacjami zawartymi w [Błażejowski i inni, 2021] w projekcie nad normą PN-EN 14023 decydującym parametrem stał się moduł sztywności lepiscza asfaltowego, natomiast dodatkowo należy określić wartość parametru m w temperaturze, w której $S=300$ MPa. W literaturze naukowej [Król i inni 2012; Słowik 2013, Błażejowski i inni 2021] można również zauważyć, iż często temperatura krytyczna wyznaczona na podstawie badania w reometrze BBR (dla $S=300$ MPa) jest porównywalna z temperaturą łamliwości oznaczoną wg Fraassa.



Rys. 6.35. Wartości temperatury (dla czasu obciążenia $t = 60$ s), gdy badane asfalty osiągnęły wartość $S=300$ MPa



Rys. 6.36. Wartości temperatury (dla czasu obciążenia $t = 60$ s), gdy badane asfalty osiągną wartość $m=0,3$

Poddając analizie wartości temperatury oznaczone dla odpowiednio $S = 300$ MPa oraz $m = 0,3$ można stwierdzić, iż przyrost zawartości kopolimerem SBS w mastyksie obniża temperaturę, w której może dojść do spękania nawierzchni. Można zauważyć również wpływ starzenia technologicznego na wartość T na podniesienie wartości temperatury krytycznej wszystkich badanych lepiszczy asfaltowych.

W ostatnich latach w literaturze naukowej dotyczącej właściwości niskotemperaturowych lepiszczy asfaltowych pojawia się parametr niskotemperaturowego ΔT_k . Na rys. 6.37 przedstawiono wartości parametru ΔT_k wyznaczonego pomiędzy dolną temperaturą przy wartości modułu sztywności $S=300$ MPa oraz dolną temperaturą wyznaczoną dla parametru $m=0,3$; zgodnie ze wzorem 6.1 [Błażejowski i inni, 2021; Anderson, 2014]:

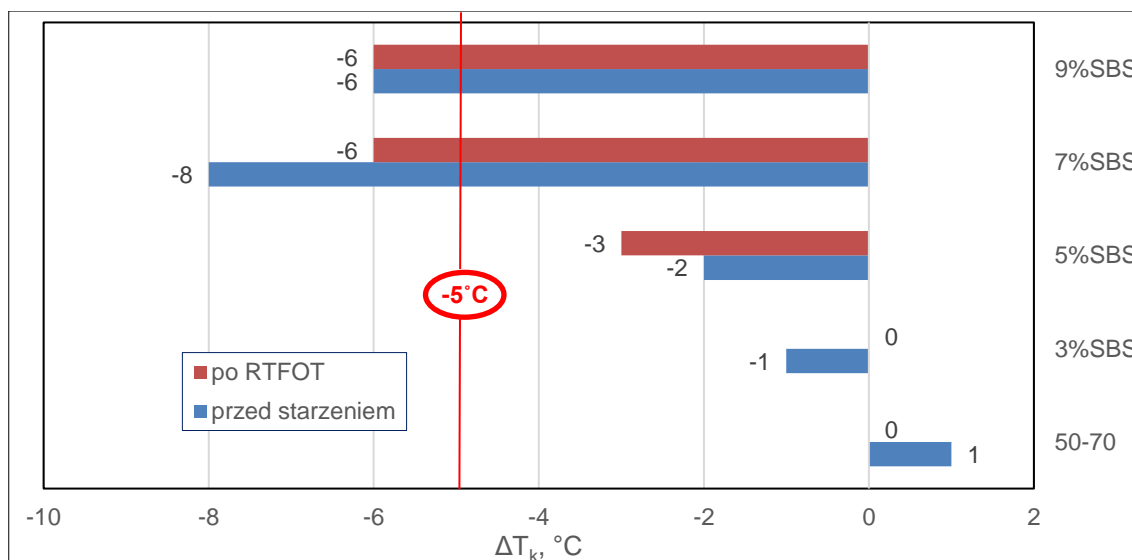
$$\Delta T_k = T_{k(S=300MPa)} - T_{k(m=0,3)} \quad (6.1)$$

gdzie:

ΔT_k - parametr niskotemperaturowy, °C

$T_{k(S=300MPa)}$ – temperatura przy $S=300$ MPa, °C

$T_{k(m=0,3)}$ – temperatura przy $m=0,3$; °C



Rys. 6.37. Parametr ΔT_k badanych lepiszczy asfaltowych

ΔT_k wykorzystywany często jako parametr służący do oceny podatności lepiszcz na spękania niskotemperaturowe. Zgodnie z literaturą szacuje się, że wartość ΔT_k nie powinna być niższa niż -5°C [Anderson, 2014]. Lepiszcz asfaltowe, u których odnotowano ΔT_k poniżej -5°C mogą charakteryzować się zwiększoną podatnością na pęknięcia (spękania niskotemperaturowe). Analizując wyniki zamieszczone na rys. 6.37 asfalty o zawartości kopolimeru SBS 7% oraz 9% (przed i po starzeniu RTFOT) wykazały ΔT_k poniżej -5°C , kolorem czerwonym na wykresie zaznaczono graniczną wartość. Może to również wynikać z faktu, iż powyższe wymagania zostały wprowadzone dla asfaltów zwykłych i niskomodyfikowanych. Wszystkie pozostałe lepiszcz asfaltowe zarówno przed jak i po starzeniu metodą RTFOT spełniają ten warunek, warto zaznaczyć, iż w większości przypadków otrzymano wartości ujemne, co może świadczyć o tym, że decydująca była wartość T_k wyznaczona dla $m=0,3$.

6.5. Badanie zjawiska relaksacji z zastosowaniem duktylometru

Oceny zjawiska relaksacji badanych asfaltów oraz mastyksów asfaltowych podjęto się wykorzystując duktylometr. Badanie przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w punkcie 5.3. Zastosowano temperaturę badania równą $-12^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ oraz prędkość rozciągania próbek równą 1 mm/min . Planując program badań wstępnie założono temperaturę badania na -16°C , natomiast podczas wstępnych prób badań mastyksów dochodziło do pęknięcia próbek podczas rozciągania, ostatecznie podniesiono temperaturę do -12°C . Próbki asfaltów i mastyksów rozciągano aż do osiągnięcia wartości siły rozciągającej równej 50 N . Po zatrzymaniu mechanizmu rozciągającego utrzymując stałą wartość odkształcenia, obserwowano zjawisko relaksacji przez okres 20 minut . Zaobserwowano bezwładność czujnika siły, ponieważ zatrzymanie mechanizmu nie występowało idealnie przy wartości 50 N (maksymalne odchylenie jakie zaobserwowano siły rozciągającej odnotowano podczas badania mastyksu $3\%\text{SBS+WW}$; wówczas siła wyniosła $57,2\text{ N}$). Na rys. 6.38 – 6.47 przedstawiono wykresy zależności naprężeń rozciągających od czasu dla badanych asfaltów oraz mastyksów asfaltowych przed i po starzeniu technologicznym metodą RTFOT.

Wartości naprężeń rozciągających obliczono na podstawie siły rozciągającej, zakładając małe odkształcenia próbki skutkujące niezmiennością przekroju poprzecznego ($A_{\text{przekroju poprzecznego}} = 1\text{ cm} \times 1\text{ cm} = 0,0001\text{ m}^2$):

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{F}}{A} \quad (6.2)$$

gdzie:

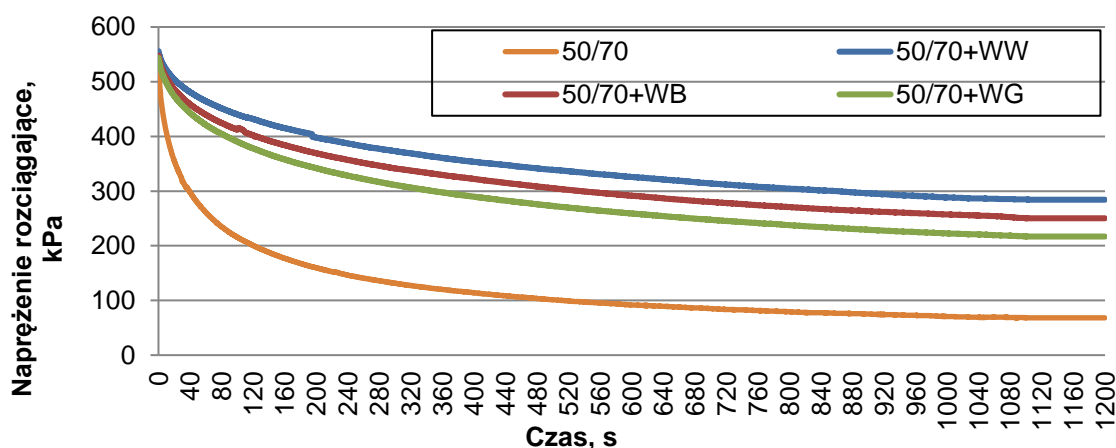
$\bar{\sigma}$ - naprężenia rozciągające, Pa

\bar{F} – siła rozciągająca, N

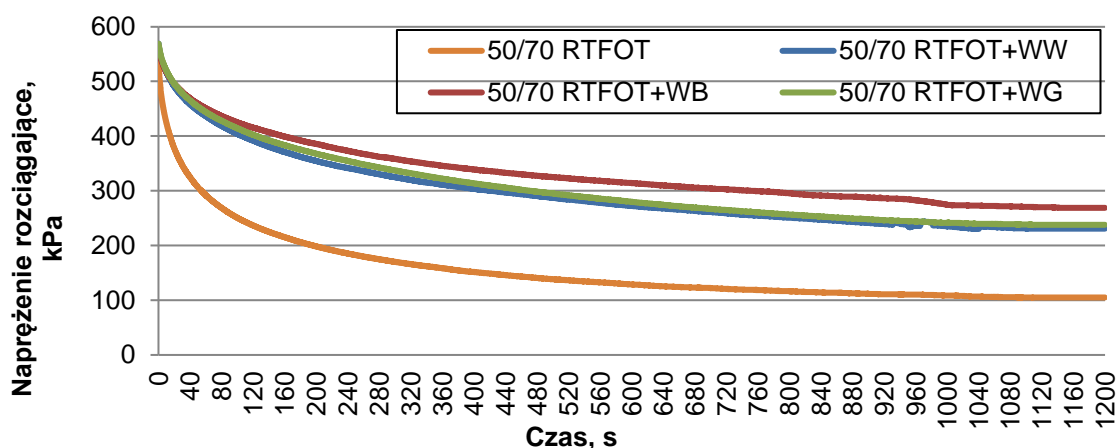
A – pole przekroju poprzecznego próbki, m^2

Zjawisko relaksacji naprężeń występuje, gdy w próbce badanego asfaltu, czy w tym przypadku również mastyksu, zostaje wywołany stan odkształcenia, o stałej

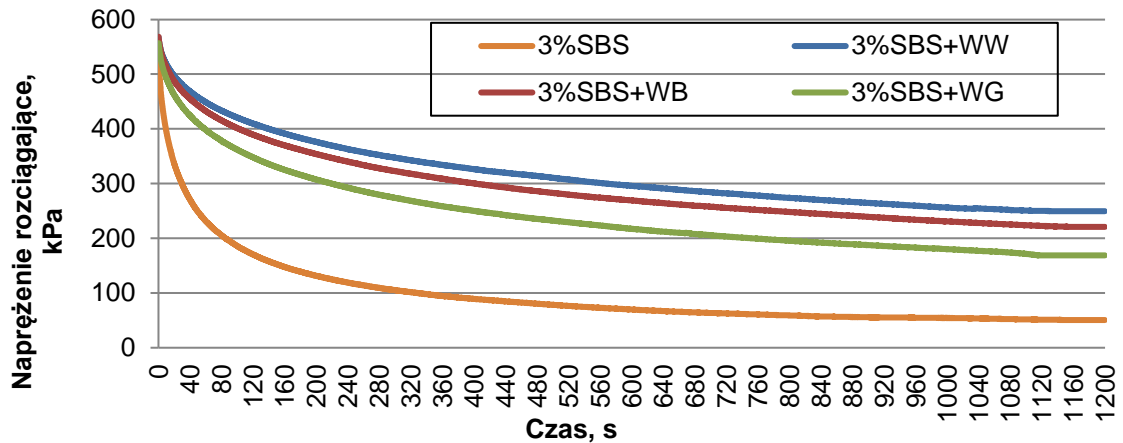
wartości, naprężenia zaś zmniejszają się w czasie. Wpływ na zjawisko relaksacji ma wiele czynników zewnętrznych, w głównej mierze jest to temperatura. Lepiszczą asfaltowe oraz mastyksy w niskich temperaturach jakie występują podczas eksploatacji nawierzchni ulegają usztywnieniu, w konsekwencji stają się podatne na pękanie oraz zmęczenie niskotemperaturowe. Analiza zmian naprężeń w czasie pozwala wyznaczyć krzywe relaksacji, które przedstawiono na rys. 6.38 – 6.47.



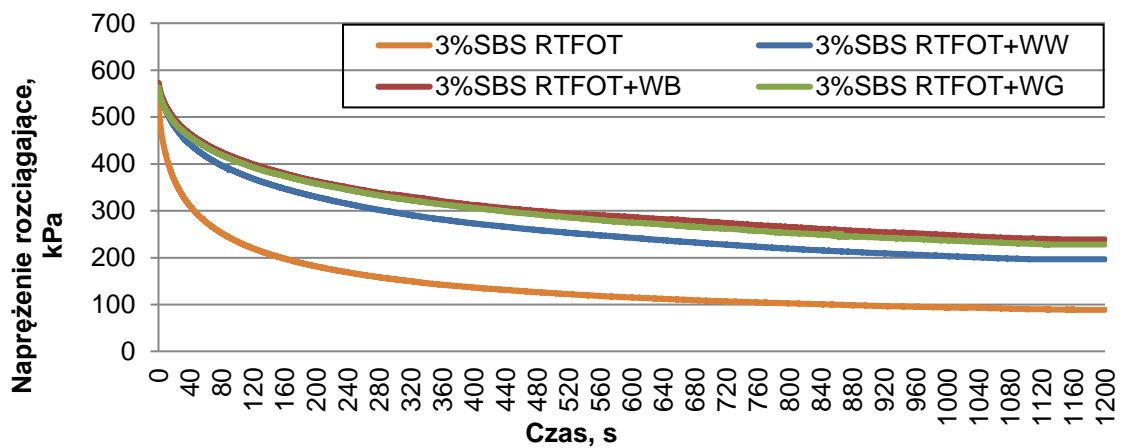
Rys. 6.38. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 50/70 oraz mastyksów



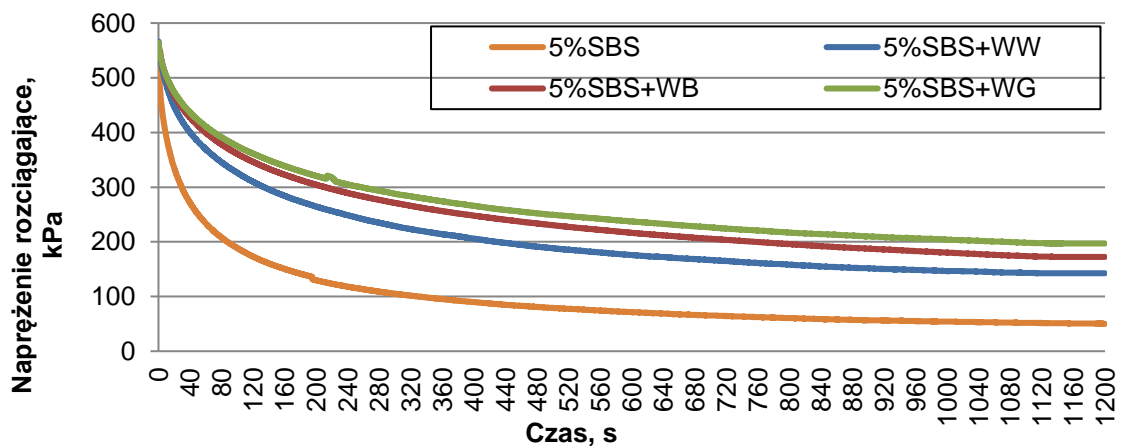
Rys. 6.39. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 50/70 oraz mastyksów (po starzeniu RTFOT)



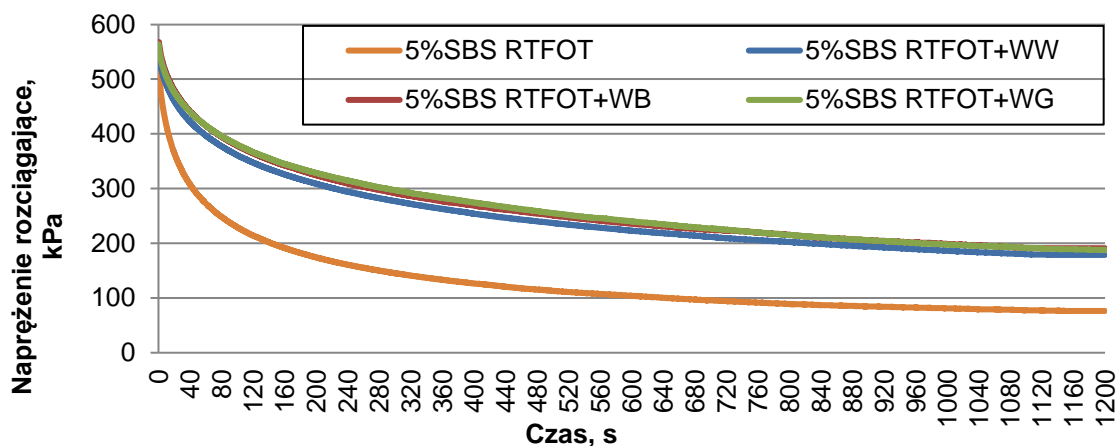
Rys. 6.40. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 3%SBS oraz mastyksów



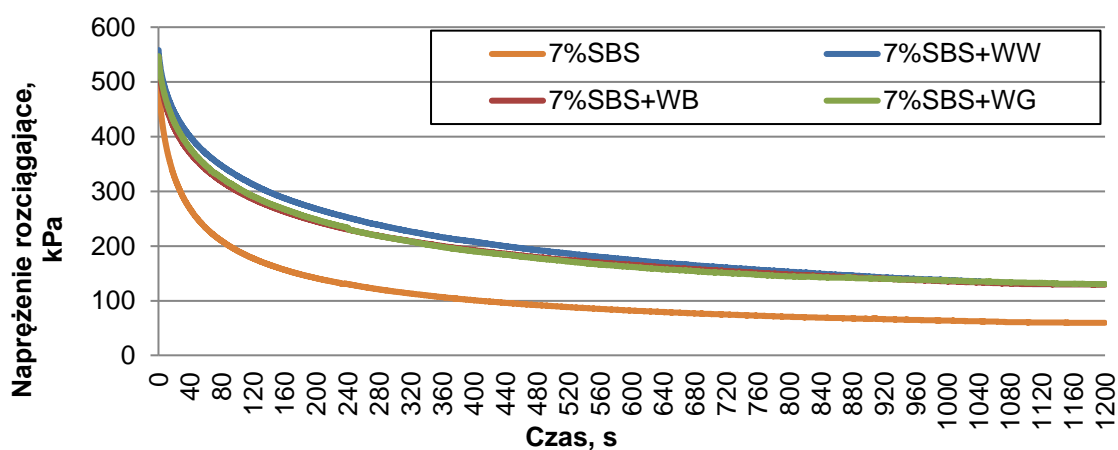
Rys. 6.41. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 3%SBS oraz mastyksów (po starzeniu RTFOT)



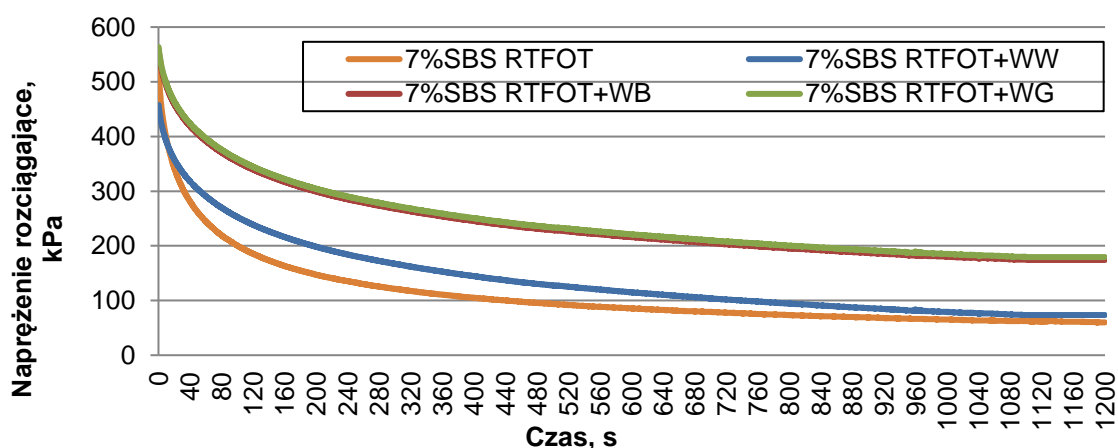
Rys. 6.42. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 5%SBS oraz mastyksów



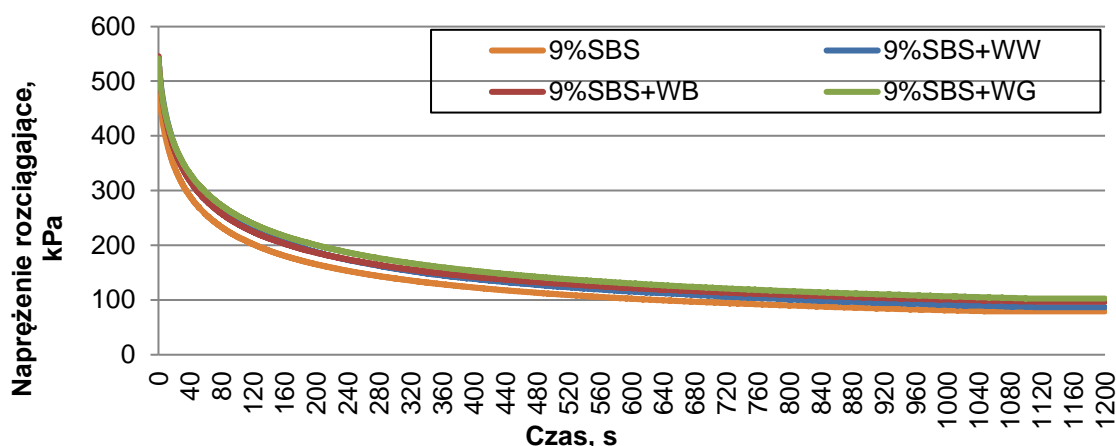
Rys. 6.43. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 5%SBS oraz mastyksów (po starzeniu RTFOT)



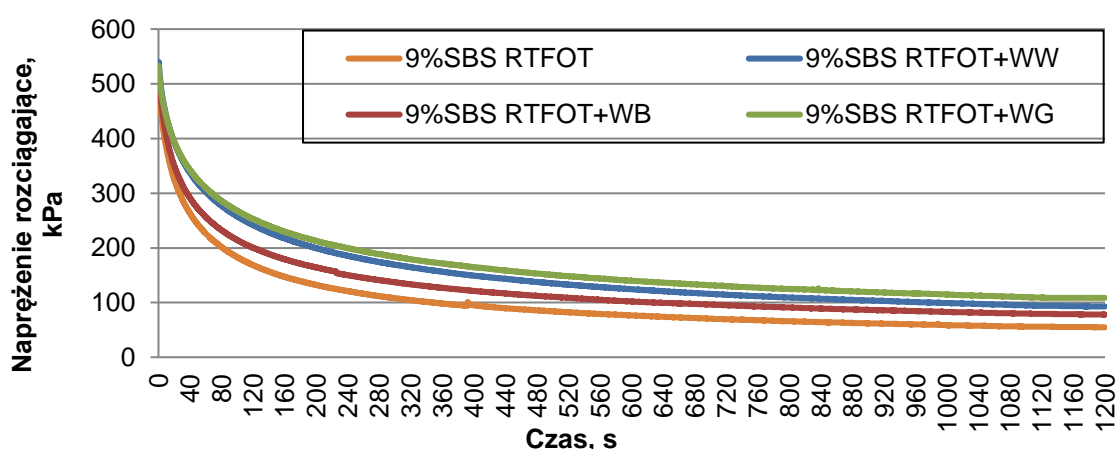
Rys. 6.44. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 7%SBS oraz mastyksów



Rys. 6.45. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 7%SBS oraz mastyksów (po starzeniu RTFOT)



Rys. 6.46. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 9%SBS oraz mastyksów



Rys. 6.47. Krzywe relaksacji uzyskane w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C dla asfaltu 9%SBS oraz mastyksów (po starzeniu RTFOT)

Analiza krzywych relaksacji w temperaturze -12°C pozwala stwierdzić że wartości naprężeń rozciągających po osiągnięciu siły 50 N dla badanych asfaltów szybko maleją, po 120 s odciążenia można zaobserwować ich zmniejszenie o 50%. Im asfalt ma większą zawartość kopolimeru SBS tym zjawisko relaksacji przebiega szybciej. Zastosowane kompozycje mastyksów w badaniu relaksacji w widoczny sposób wpłynęły na spowolnienia intensywności zmian wartości naprężeń w porównaniu z asfaltem bazowym. Świadczy to o tym, że obecność wypełniacza w znaczny sposób wpłynęła na charakterystykę lepkosprężystą wszystkich mastyksów w zakresie niskich temperatur. W przypadku mastyksów 50/70+WW oraz 3%SBS+WW przed starzeniem można zauważyć iż właśnie przy wypełniaczu wapiennym najwolniej następuje zjawisko relaksacji i jego „intensywność” jest najmniejsza. Natomiast zupełnie inaczej zachowują się te mastyksy po starzeniu metodą RTFOT, w tym przypadku 50/70 RTFOT+WW oraz 3%SBS RTFOT+WW cechują się największą zdolnością do relaksacji wśród

badanych mastyksów w tej grupie. Dodatkowo można zaobserwować, iż im większa zawartość kopolimeru SBS w badanym mastyksie tym zjawisko relaksacji charakteryzuje się większą intensywnością. Najmniejsze różnice w zmianie naprężeń obserwowano w mastyksach sporządzonych z udziałem asfaltu 9%SBS, gdyż po 1200 s od chwili wywołania warunków stałego odkształcenia dążą do zbliżonych wartości naprężeń co asfalt bazowy, tzn. dla 9%SBS 86,2 kPa, zaś dla 9%SBS+WG 102,2 kPa. Biorąc pod uwagę mastyksy modyfikowane kopolimerem SBS można zauważyć, iż są bardziej podatne na zjawisko relaksacji (szybciej można zauważyć redukcję naprężeń) zarówno przed, jak i po starzeniu metodą RTFOT, co może się wiązać z odpornością nawierzchni na spękania niskotemperaturowe, ponieważ zapobiega to kumulowaniu naprężeń w warstwach asfaltowych. Warto też zwrócić uwagę na dobór wypełniacza, który będzie decydował w znacznym stopniu o właściwościach MMA. Wypełniacz granodiorytowy najmocniej wpłynął na zmniejszenie redukcji naprężeń w analizowanych mastyksach modyfikowanych, zaś w przypadku asfaltu 50/70 i niskomodyfikowanego 3%SBS, to właśnie tradycyjnie stosowany w budownictwie drogowym wypełniacz wapienny cechował się najmniejszą zdolnością do relaksacji.

Modelując zjawisko relaksacji asfaltów oraz mastyksów wykorzystano jako podstawowy model Maxwella. Jako bazowy zastosowano model czteroparametrowy, tj. składający się z połączonych równolegle dwóch elementów Maxwella. Model ten opisuje ciała wykazujące właściwości lepkosprężyste; tj. odkształcenie sprężyste, pełzanie oraz relaksację naprężeń. Naprężenia całkowite w przyjętym modelu stanowią sumę naprężeń z wszystkich n-elementów modelu, zgodnie z równaniem [Słowik, 2013]:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{E_i}{\eta_i} \cdot t\right) \quad (6.3)$$

lub

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (6.4)$$

gdzie:

$\sigma(t)$ – naprężenie w czasie t ,

ε_0 – max. odkształcenie występujące po 20 min obserwacji relaksacji,

t – czas,

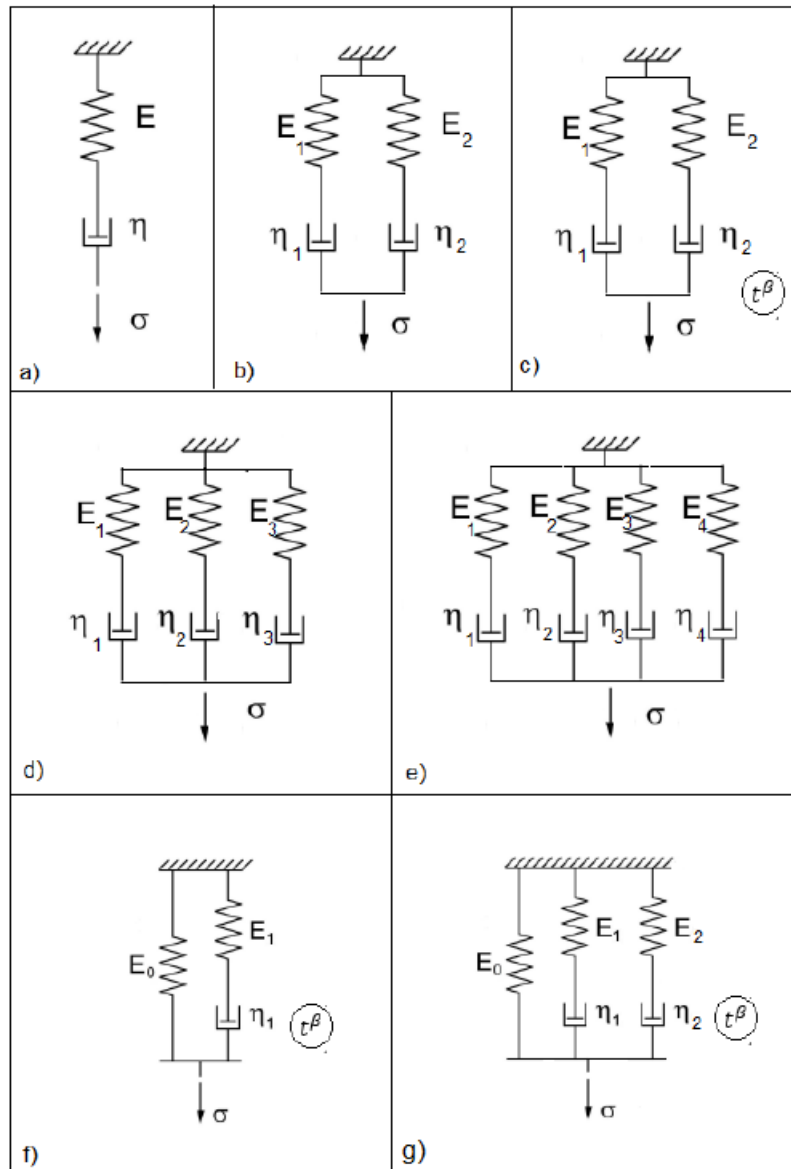
E_i – moduł sprężystości w i -tym elemencie Hooke'a,

η_i – lepkość dynamiczna w i -tym elemencie Newton'a,

$\tau_i = \frac{\eta_i}{E_i}$, czas relaksacji i -tego elementu Maxwella.

Parametry modeli Maxwella wyznaczono za pomocą oprogramowania Nonlinear Least Squares Regression, metodą najmniejszych kwadratów odchyłeń dopasowując do funkcji naprężeń w czasie uzyskanych w wyniku badań laboratoryjnych. Wartości naprężeń wyznaczono zgodnie z metodyką opisaną na początku podrozdziału 6.2.4.

Wstępne próby aproksymacji wyników eksperymentu rozpoczęto od asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z udziałem tego asfaltu. Zastosowano wstępnie cztery modele standardowe zawierające 2, 4, 6 i 8 parametrów, zestawienie parametrów modeli przedstawiono w tab. 6.14.



Rys.6.48. Schematy mechaniczne modeli ośrodków lepkosprężystych a) Maxwella 2 parametry, b) Maxwella 4 parametry, c) Maxwella 5 parametry zmodyfikowany o t^β d) Maxwella 6 parametry, e) Maxwella 8 parametry, f) model Hooke'a-Maxwella 4 parametry zmodyfikowany o t^β , f) model Hooke'a-Maxwella 6 parametry zmodyfikowany o t^β

Wartości parametrów uogólnionego i-elementowego modelu Maxwella oraz parametrów statystycznego dopasowania do krzywych relaksacji przedstawiono w tab.6.14 dla asfaltów i mastyksów nie poddanych starzeniu oraz w tab. 6.15 po starzeniu RTFOT. Analizie poddano również parametry statystyczne dopasowania do krzywych relaksacji R^2 (współczynnik determinacji), RMS Error (pierwiastek z błędu średniokwadratowego) oraz SSq (suma kwadratów odchyleń).

Tab. 6.14. Wartości parametrów uogólnionego modelu Maxwella dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z udziałem tego asfaltu na podstawie wyników testu relaksacji naprężeń w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C

	3%SBS	3%SBS+WW	3%SBS+WB	3%SBS+WG
Model 2 parametrowy, rys. 6.48 a				
R ²	0,78048	0,89852	0,89004	0,88523
RMS Error	3,09E+04	2,03E+04	2,23E+04	2,48E+04
SSq	5,72E+12	2,47E+12	2,99E+12	3,68E+12
Moduł sprężystości E, Pa	2,27E+07	7,94E+07	6,65E+07	6,92E+07
Lepkość dynamiczna η , Pa·s	1,02E+10	1,39E+11	1,02E+11	8,01E+10
Model 4 parametrowy, rys. 6.48 b				
R ²	0,98936	0,99659	0,99653	0,99646
RMS Error	6,78E+03	3,72E+03	3,97E+03	4,35E+03
SSq	2,76E+11	8,31E+10	9,44E+10	1,13E+11
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	2,65E+07	6,67E+07	5,44E+07	5,35E+07
Lepkość dynamiczna η_1 , Pa·s	1,55E+09	1,91E+11	1,38E+11	1,04E+11
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	1,22E+07	2,87E+07	2,78E+07	3,60E+07
Lepkość dynamiczna η_2 , Pa·s	1,20E+10	3,69E+09	3,38E+09	3,97E+09
Model 6 parametrowy, rys. 6.48 d				
R ²	0,99926	0,99954	0,99984	0,99978
RMS Error	1,79E+03	1,37E+03	8,42E+02	1,08E+03
SSq	8,99E+04	1,12E+10	4,25E+09	6,95E+09
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	1,89E+07	5,79E+07	4,92E+07	4,73E+07
Lepkość dynamiczna η_1 , Pa·s	3,95E+08	2,61E+11	1,65E+11	1,57E+11
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	1,65E+07	2,74E+07	2,50E+07	2,27E+07
Lepkość dynamiczna η_2 , Pa·s	2,48E+09	7,70E+09	5,40E+09	4,60E+09
Moduł sprężystości E ₃ , Pa	8,14E+06	1,49E+07	1,36E+07	1,98E+07
Lepkość dynamiczna η_3 , Pa·s	1,48E+10	4,91E+08	3,30E+08	4,85E+08
Model 8 parametrowy, rys. 6.48 e				
R ²	0,99992	0,99976	0,99995	0,99994
RMS Error	5,77E+02	9,94E+02	4,70E+02	5,86E+02
SSq	2,00E+09	5,92E+09	1,32E+09	2,06E+09
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	1,63E+07	5,30E+07	4,76E+07	4,41E+07
Lepkość dynamiczna η_1 , Pa·s	8,05E+08	3,21E+11	1,76E+11	1,31E+11
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	1,31E+07	2,81E+07	2,43E+07	2,92E+07
Lepkość dynamiczna η_2 , Pa·s	3,59E+09	1,09E+10	6,16E+09	7,47E+09
Moduł sprężystości E ₃ , Pa	1,08E+07	1,44E+07	1,18E+07	1,63E+07
Lepkość dynamiczna η_3 , Pa·s	9,83E+07	8,98E+08	4,85E+08	8,11E+08
Moduł sprężystości E ₄ , Pa	5,07E+06	7,21E+06	5,97E+06	8,93E+06
Lepkość dynamiczna η_4 , Pa·s	3,38E+10	5,85E+07	3,95E+07	6,92E+07

Następnie zastosowano trzy zmodyfikowane modele. W pierwszym zgodnie ze wzorem 6.5 (rys. 6.48 c) wprowadzono wykładnik t (opisany jako β), następnie zaś wprowadzono do modelu podstawowego Maxwella dodatkowo ciało Hooke'a uzyskując w ten sposób dwa modele zgodnie z rys. 6.48 f,g. Zastosowano modele cztero i sześcioparametrowy zgodnie ze wzorami (wzór 6.6 i wzór 6.7).

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \left[E_1 \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} \cdot t^\beta\right) + E_2 \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot t^\beta\right) \right] \quad (6.5)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \left[E_0 + E_1 \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} \cdot t^\beta\right) \right] \quad (6.6)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot \left[E_0 + E_1 \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} \cdot t^\beta\right) + E_2 \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} \cdot t^\beta\right) \right] \quad (6.7)$$

Tab. 6.15. Wartości parametrów uogólnionego modelu Maxwella dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych na jego bazie na podstawie wyników testu relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C

	3%SBS	3%SBS+WW	3%SBS+WB	3%SBS+WG
Model 4 parametrowy zmodyfikowany o t^β, rys. 6.48 f				
R ²	0,99929	0,99977	0,99993	0,99990
RMS Error	1,75E+03	9,67E+02	5,41E+02	7,26E+02
SSq	1,84E+10	5,61E+09	1,75E+09	3,16E+09
Moduł sprężystości E ₀ , Pa	3,58E+06	2,70E+07	2,07E+07	1,71E+07
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	4,86E+07	7,86E+07	7,23E+07	8,64E+07
Lepkość dynamiczna η ₁ , Pa·s	2,92E+08	1,55E+09	1,19E+09	1,25E+09
Wykładnik potęgi czasu β	0,45	0,48	0,46	0,47
Model 6 parametrowy zmodyfikowany o t^β, rys. 6.48 g				
R ²	0,999942	0,999806	0,999947	0,99993
RMS Error	5,01E+02	8,87E+02	4,88E+02	5,79E+02
SSq	1,51E+09	4,71E+09	1,43E+09	2,01E+09
Moduł sprężystości E ₀ , Pa	3,77E+06	3,43E+07	2,33E+07	1,67E+07
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	2,18E+07	5,66E+07	5,82E+07	6,36E+07
Lepkość dynamiczna η ₁ , Pa·s	1,81E+08	3,86E+09	2,00E+09	2,21E+09
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	2,14E+07	1,24E+07	9,93E+06	2,07E+07
Lepkość dynamiczna η ₂ , Pa·s	7,81E+08	1,20E+08	6,75E+07	1,91E+08
Wykładnik potęgi czasu β	0,69	0,67	0,57	0,57
Model 5 parametrowy wg wzoru 6.5., rys. 6.48 c				
R ²	0,99958	0,99976	0,99994	0,99993
RMS Error	1,34E+03	9,78E+02	5,19E+02	5,94E+02
SSq	1,08E+10	5,74E+09	1,61E+09	2,12E+09
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	3,94E+07	7,04E+07	5,31E+07	5,21E+07
Lepkość dynamiczna η ₁ , Pa·s	2,78E+08	1,37E+09	7,96E+08	6,90E+08
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	1,04E+07	3,48E+07	3,92E+07	4,96E+07
Lepkość dynamiczna η ₂ , Pa·s	4,45E+08	9,70E+09	3,89E+09	3,41E+09
Wykładnik potęgi czasu β	0,52	0,49	0,49	0,52

Analizując wartości parametrów zestawione w tab. 6.14 dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS i mastyksów sporządzonych z jego udziałem przed starzeniem najlepsze dopasowanie do krzywej relaksacji obserwujemy dla modelu 8-parametrowego, co zgodnie z literaturą oczekiwano uzyskać. Potwierdzają to największe wartości współczynnika determinacji ($R^2 > 0,999$) oraz najmniejsze wartości błędu RMS i sumy kwadratów odchyłeń SSq. Najsłabsze dopasowanie odnotowano dla modelu 2-parametrowego ($R^2 > 0,78$), który wprowadzono jedynie w celach porównawczych. Podkreślić należy fakt, iż w każdym z pozostałych modeli zaobserwowano wysokie wartości współczynnika determinacji ($R^2 > 0,99$), natomiast należy zwrócić uwagę na

pozostałe parametry statystyczne opisujące krzywą relaksacji (np. 3-krotna różnica w wartościach RMS Error) które znacznie się różniły. Wiadomym jest, iż zwiększając liczbę parametrów w modelu można spodziewać się lepszego dopasowanie krzywych analitycznych i empirycznych, ale duża liczba parametrów w modelu utrudnia ocenę uzyskanych rezultatów. W związku z tym dokonano korekty równanie 6.3 zmieniając dziedzinę czasu na t^β , tym samym zmniejszając ilość parametrów (w tab. 6.15 opisano jako model 5-parametrowy). Wykorzystując model 5-parametrowy z dziedziną t^β uzyskuje się lepsze dopasowanie (na podstawie parametrów statystycznych) niż dla modelu 6-parametrowego z dziedziną t , natomiast są nieco gorsze w porównaniu z modelem 8-parametrowym z dziedziną t . Zauważono, iż parametr β w modelu 5-parametrowym dla badanych asfaltów i mastyksów o zawartości 3%SBS osiąga wartość w zakresie od 0,49 do 0,53; co sugerowało by przyjąć wartość stałą tego parametru w modelu. Jednak w pozostałych badanych mastyksach nie można było wykorzystać tej zależności, ponieważ wartości parametru β zawierała się w zakresie od 0,42 dla asfaltu 7%SBS do 0,55 dla 50/70+WW w przypadku modelu czteroparametrowego. Najlepszą zbieżność aproksymowanych wyników uzyskano stosując modele cztero- i sześcioparametrowy składające się z elementu Hooke'a oraz 1-2 elementów Maxwella połączonych równolegle. Parametr β wprowadzono we wzorze jako wykładnik czasu. Uzyskane wyniki umieszczono przykładowo dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksami sporządzonymi na jego bazie w tab.6.15.

Tab. 6.16. Wartości parametrów uogólnionego modelu Maxwella dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z jego udziałem po starzeniu metodą RTFOT na podstawie wyników testu relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C

	3%SBS RTFOT	3%SBS+WW RTFOT	3%SBS+WB RTFOT	3%SBS+WG RTFOT
Model 2 parametry, rys. 6.48 a				
R ²	0,77706	0,87682	0,87528	0,89143
RMS Error	3,05E+04	2,50E+04	2,27E+04	2,18E+04
SSq	5,59E+12	3,76E+12	3,10E+12	2,86E+12
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	3,30E+07	7,86E+07	8,27E+07	7,03E+07
Moduł lepkości η ₁ , Pa·s	2,48E+10	1,03E+11	1,40E+11	1,11E+11
Model 4 parametry, rys. 6.48 b				
R ²	0,99064	0,99551	0,99723	0,99669
RMS Error	6,26E+03	4,78E+03	3,39E+03	3,82E+03
SSq	2,35E+11	1,37E+11	6,89E+10	8,74E+10
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	3,17E+07	6,20E+07	6,89E+07	5,78E+07
Moduł lepkości η ₁ , Pa·s	2,27E+09	1,39E+11	1,95E+11	1,52E+11
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	2,16E+07	3,87E+07	3,41E+07	2,85E+07
Moduł lepkości η ₂ , Pa·s	3,22E+10	4,35E+09	3,84E+09	3,49E+09
Model 6 parametry, rys. 6.48 d				
R ²	0,99955	0,99965	0,99971	0,99972
RMS Error	1,38E+03	1,34E+03	1,09E+03	1,12E+03
SSq	1,13E+10	1,07E+10	7,12E+09	7,50E+09
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	2,21E+07	5,37E+07	6,58E+07	5,18E+07
Moduł lepkości η ₁ , Pa·s	3,34E+09	1,74E+11	2,14E+11	1,86E+11
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	2,07E+07	3,40E+07	2,96E+07	2,56E+07
Moduł lepkości η ₂ , Pa·s	4,11E+08	7,58E+09	4,88E+09	5,93E+09
Moduł sprężystości E ₃ , Pa	1,75E+07	2,08E+07	1,41E+07	1,40E+07
Moduł lepkości η ₃ , Pa·s	4,00E+10	5,39E+08	2,74E+08	3,92E+08
Model 8 parametry, rys. 6.48 e				
R ²	0,99996	0,99983	0,99976	0,99989
RMS Error	4,14E+02	9,28E+02	1,00E+03	7,08E+02
SSq	1,03E+09	5,16E+09	6,05E+09	3,00E+09
Moduł sprężystości E ₁ , Pa	1,84E+07	4,39E+07	6,52E+07	4,09E+07
Moduł lepkości η ₁ , Pa·s	3,88E+09	2,63E+11	2,18E+11	3,37E+11
Moduł sprężystości E ₂ , Pa	1,75E+07	3,42E+07	2,84E+07	2,85E+07
Moduł lepkości η ₂ , Pa·s	7,34E+08	1,32E+10	5,03E+09	1,32E+10
Moduł sprężystości E ₃ , Pa	1,56E+07	1,91E+07	1,16E+07	1,52E+07
Moduł lepkości η ₃ , Pa·s	4,69E+10	1,38E+09	3,58E+08	1,19E+09
Moduł sprężystości E ₄ , Pa	1,10E+07	1,30E+07	5,71E+06	8,36E+06
Moduł lepkości η ₄ , Pa·s	8,38E+07	1,65E+08	3,57E+07	9,60E+07

Tab. 6.17. Wartości parametrów uogólnionego modelu Maxwella dla asfaltu modyfikowanego 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z jego udziałem po starzeniu metodą RTFOT na podstawie wyników testu relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C

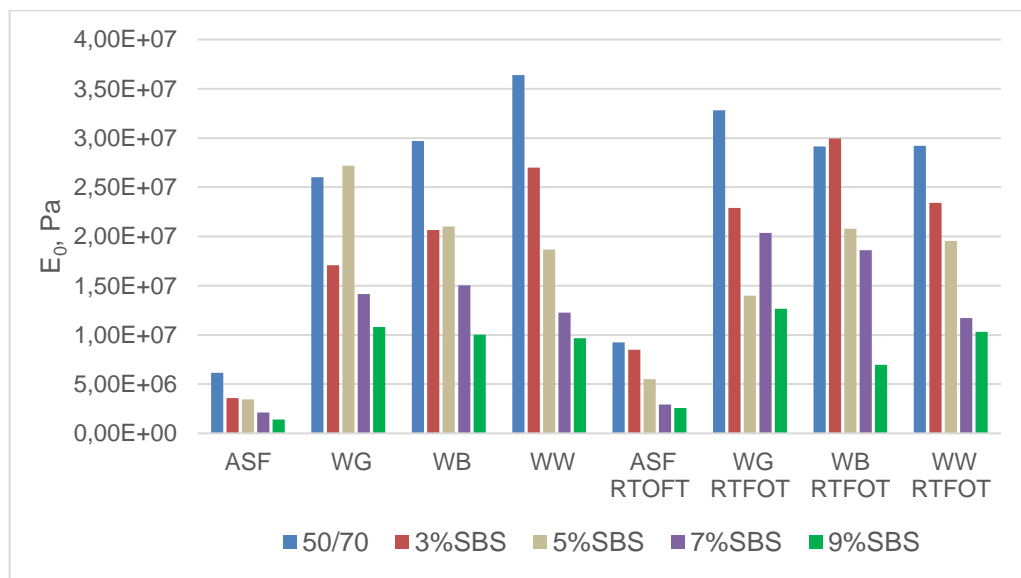
	3%SBS RTFOT	3%SBS+WW RTFOT	3%SBS+WB RTFOT	3%SBS+WG RTFOT
Model 4 parametry zmodyfikowany o t^{β} , rys. , rys. 6.48 f				
R^2	0,99961	0,99987	0,99946	0,99980
RMS Error	1,28E+03	7,44E+02	1,49E+03	1,01E+03
SSq	9,89E+09	3,32E+09	1,33E+10	6,14E+09
Moduł sprężystości E_0 , Pa	8,50E+06	2,29E+07	3,00E+07	2,34E+07
Moduł sprężystości E_1 , Pa	6,17E+07	7,39E+07	8,68E+07	9,28E+07
Moduł lepkości η_1 , Pa·s	4,00E+08	1,29E+09	1,23E+09	1,31E+09
Wykładnik potęgi czasu β	0,43	0,47	0,45	0,46
Model 6 parametry zmodyfikowany o t^{β} , rys. 6.48 g				
R^2	0,99997	0,99955	0,99955	0,99986
RMS Error	3,45E+02	1,36E+03	1,36E+03	8,40E+02
SSq	7,14E+08	1,11E+10	1,11E+10	4,24E+09
Moduł sprężystości E_0 , Pa	8,61E+06	1,63E+07	1,63E+07	2,88E+07
Moduł sprężystości E_1 , Pa	3,09E+07	6,03E+07	6,03E+07	6,45E+07
Moduł lepkości η_1 , Pa·s	8,96E+08	7,57E+09	7,57E+09	3,41E+09
Moduł sprężystości E_2 , Pa	2,54E+07	3,44E+07	3,44E+07	1,92E+07
Moduł lepkości η_2 , Pa·s	1,84E+08	5,81E+08	5,81E+08	1,67E+08
Wykładnik potęgi czasu β	0,62	0,64	0,64	0,66
Model 5 parametry* wg wzoru 6.5, rys. 6.48 c				
R^2	0,99987	0,99988	0,99973	0,99980
RMS Error	7,31E+02	7,29E+02	1,07E+03	1,01E+03
SSq	3,21E+09	3,18E+09	6,80E+09	6,12E+09
Moduł sprężystości E_1 , Pa	4,70E+07	5,32E+07	7,38E+07	8,50E+07
Moduł lepkości η_1 , Pa·s	3,54E+08	8,42E+08	1,13E+10	1,17E+09
Moduł sprężystości E_2 , Pa	2,00E+07	4,29E+07	3,82E+07	3,09E+07
Moduł lepkości η_2 , Pa·s	1,10E+09	4,63E+09	6,03E+08	5,74E+09
Wykładnik potęgi czasu β	0,51	0,50	0,61	0,47

Wstępne aproksymację krzywych relaksacji przeprowadzono również dla asfaltów modyfikowanych 3%SBS oraz mastyksów sporządzonych z jego udziałem poddanych starzeniu technologicznemu metodą RTFOT. Analizując parametry statystycznego dopasowania krzywych można zauważyć podobne zależności jak dla materiałów przed starzeniem RTFOT. Najlepsze dopasowanie do krzywych relaksacji uzyskano za pomocą modelu 8-elementowego, zaś najgorsze dopasowanie odnotowano dla modelu 2-parametrowego. W przypadku asfaltów i mastyksów poddanych starzeniu metodą RTFOT również wykorzystano modele zmodyfikowane o wykładnik potęgi czasu β . W tab. 6.16. można zauważyć podobno regułę jak w tab.6.14 iż model zmodyfikowany 5-parametrowy (dwa elementy Maxwella oraz wykładnik potęgi czasu β uzyskuje lepsze krzywe dopasowania do krzywych relaksacji niż model 6 parametrowy z dziedziną czasu t , wypada gorzej niż model 8-parametrowy z dziedziną czasu t . Parametr β osiągnął się w tym przypadku wartość w zakresie od 0,44 dla

mastyksu 9%SBS RTFOT+WG do 0,54 dla 50/70 RTFOT+WB. W przypadku modelu 6-parametrowego z dziedziną t^β , zauważono lepsze dopasowanie aproksymowanych wyników niż dla 8 parametrowego modelu ($R^2 > 0,9999$)

Podsumowując analizy wykorzystanych do opisu zjawiska relaksacji modeli reologicznych do dalszych analiz dla wszystkich badanych asfaltów oraz mastyksów zastosowano dwa modele zmodyfikowane o wykładnik potęgi czasu β (dziedzina t^β) składające się z elementów Hooke'a oraz Maxwella połączonych równolegle (rys. 6.48 f i g).

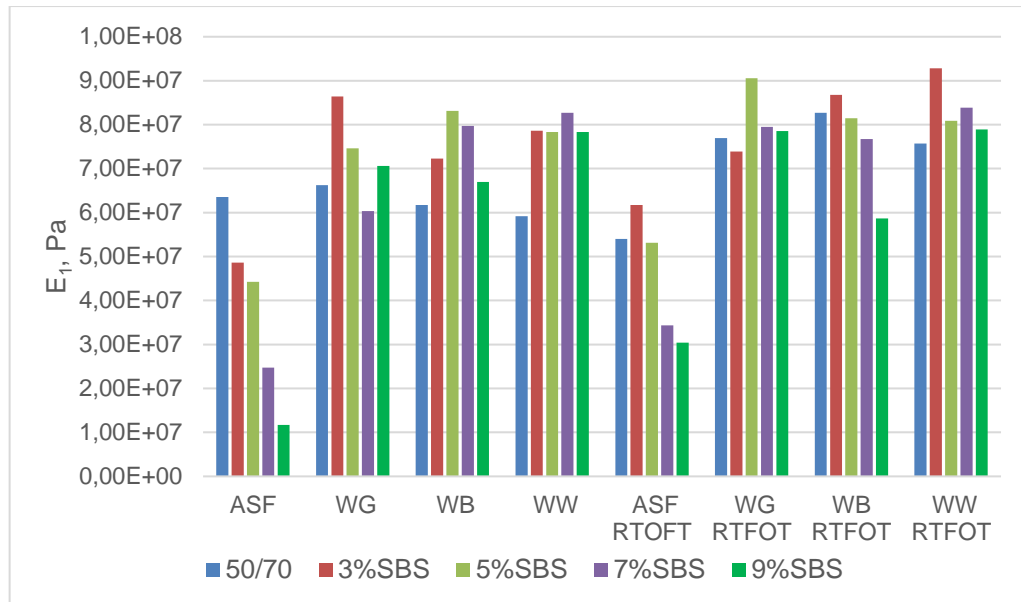
Na rys. 6.49 – 6.52 przedstawiono parametry modeli E_0 , E_1 , η_1 oraz β dla wszystkich badanych materiałów zarówno przed jak i po starzeniu metodą RTFOT dla modelu składającego się z elementu Hooke'a i pojedynczego elementu Maxwella. Wartości parametrów dla drugiego z analizowanych modeli składającego się z 6 parametrów zmodyfikowany o t^β umieszczono w załączniku B.1-B.5.



Rys. 6.49. Wartości parametru E_0 dla modelu czteroparametrowego z dziedziną t^β

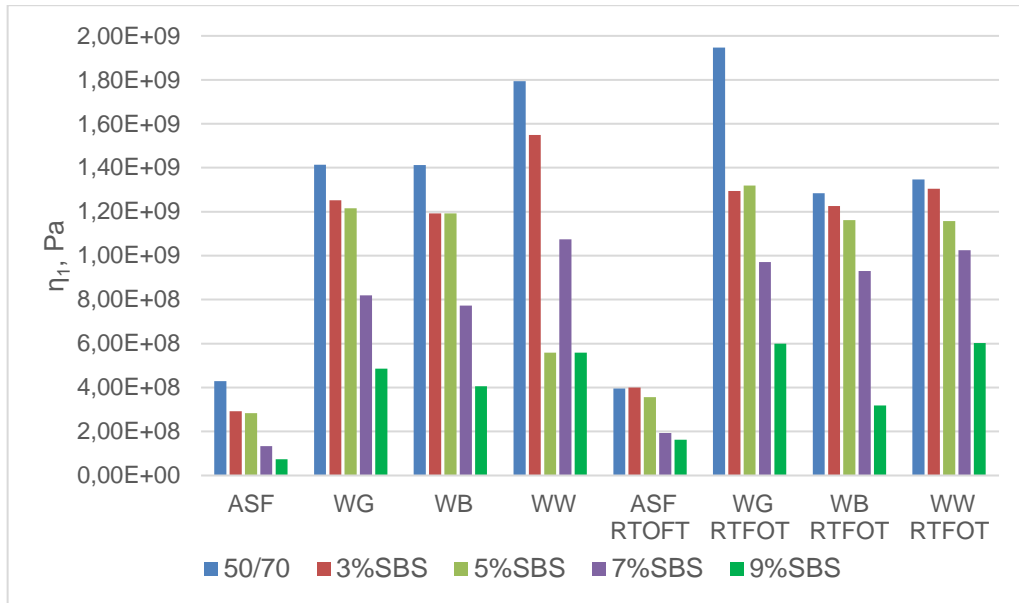
Analizując wartości parametru E_0 modelu zgodnie z równaniem 6.6, co przedstawiono na rys. 6.49. można wnioskować że są zależne od zawartości kopolimeru SBS w badanym asfalcie czy mastyksie. Ponadto warto podkreślić, że starzenie technologiczne metodą RTFOT na również istotny wpływ na ich wartość. Analizując parametr E_0 zauważono, że przyrost zawartości kopolimeru SBS powoduje zmniejszenie wartości tego parametru. Te zależności są również zauważalne dla analizowanych mastyksów. W przypadku mastyksów z

wypełniaczem granitowym można zauważyć, że E_0 osiąga dla 5%SBS+WG wartość największą wśród wszystkich analizowanych mastyksów granitowych przed starzeniem. Natomiast po starzeniu dla tego przypadku wartość ta gwałtownie się zmniejsza.



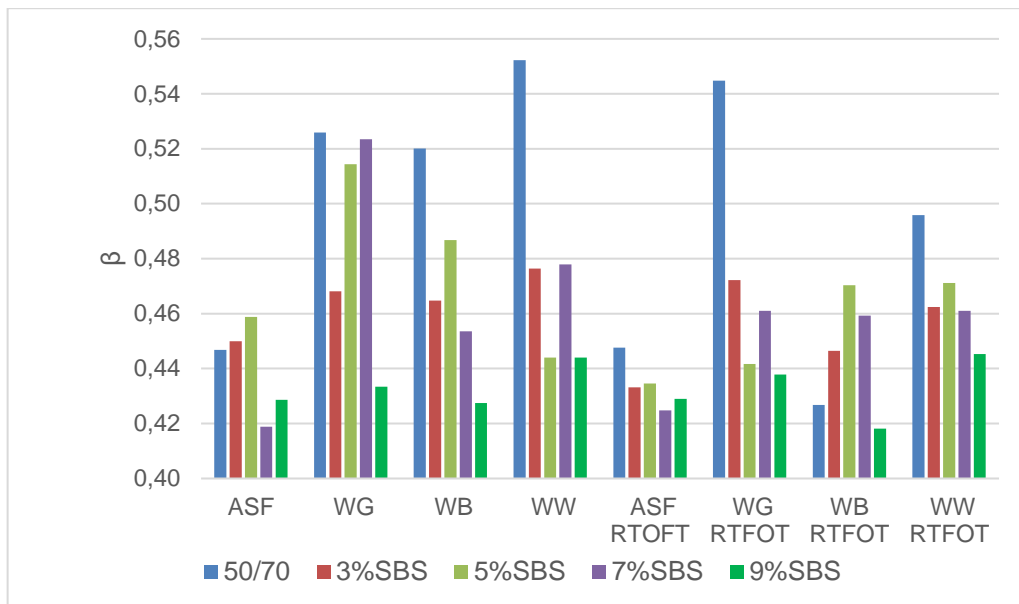
Rys. 6.50. Wartości parametru E_1 dla modelu czteroparametrowego

Analizując wartości parametru E_1 zamieszczone na rys. 6.50. zauważono również prostą zależność, iż przyrost zawartości kopolimeru SBS powoduje zmniejszenie wartości parametru E_1 , ale tylko w przypadku badanych asfaltów. Nie zaobserwujemy tego zjawiska w przypadku mastyksów. Można wręcz stwierdzić, że występuje tendencja odwrotna, wraz ze wzrostem zawartości kopolimeru SBS w mastyksie zwiększa się wartość parametru E_1 . Natomiast dzieje się tak dla mastyksów o zawartości kopolimeru w asfalcie równej 5% SBS. Powyżej tej granicy zaobserwowano zmniejszenie wartości tego parametru. Dodatek wypełniacza do asfaltu modyfikowanego w każdym przypadku powoduje przyrost wartości parametru E_1 , zarówno przed jak i po starzeniu metodą RTFOT.



Rys. 6.51. Wartości parametru η_1 dla modelu czteroparametrowego z dziedzina t^{i_b}

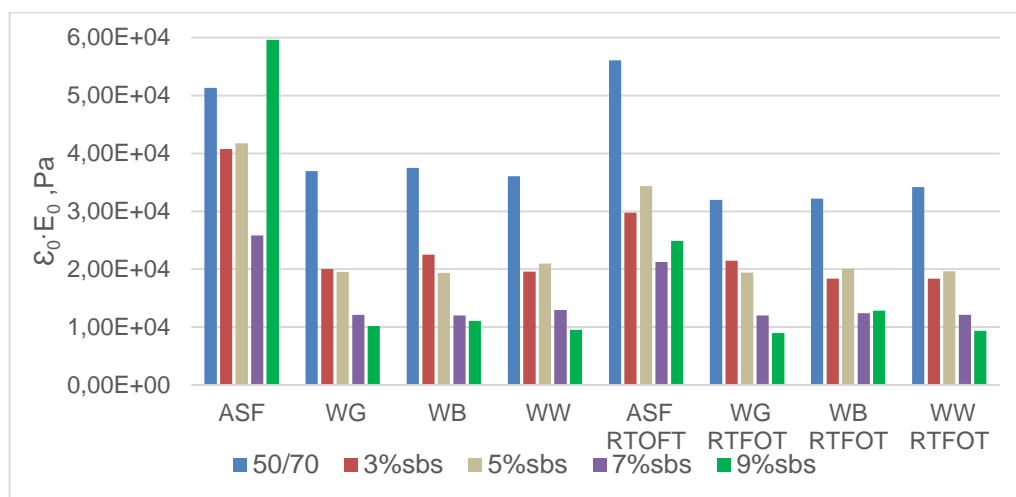
Kolejnym parametrem analizowanym w modelu zgodnie z równaniem 6.6. jest lepkość dynamiczna ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) oznaczona jako η_1 . Wartość tego parametru przedstawiono na rys. 6.51. Można zauważyć zależność podobną do występującej w przypadku parametru E_0 . Wraz ze wzrostem zawartości kopolimeru w asfalcie czy też mastyksie zauważono zmniejszenie wartości η_1 (wyjątek stanowi 5%SBS+WW w tym przypadku zauważono gwałtowny spadek wartości w stosunku do mastyksów zawierających asfalt modyfikowany 3 i 7 %SBS). Analizując mastyksy przed starzeniem RTFOT można zauważyć, że dodając wypełniacz granodiorytowy oraz bazaltowy uzyskuje wartości parametru η_1 na zbliżonym poziomie, natomiast wypełniacz wapienny uzyskał niezależnie od asfaltu bazowego największe wartości tego parametru (wyjątek stanowi mastyks z udziałem asfaltu 5%SBS).



Rys. 6.52. Wartości parametru β dla modelu czteroparametrowego z dziedziną t^β

Na rys. 6.52. przedstawiono wartości parametru β będącego wykładnikiem czasu we wzorze 6.6. Wartości parametru β zawiera się w przedziale od 0,41 dla mastyksu 9%SBS RTFOT+WB do 0,55 dla asfaltu 50/70+WW.

Na podstawie wyznaczonych krzywych relaksacji zauważono, iż wartości naprężeń w funkcji czasu nie zawsze dążyły do zera, lecz wprowadzając w modelu element Hooke'a można zaobserwować, iż dążyły asymptotycznie do wartości $E_0 \cdot \epsilon_0$, co przedstawiono na rys. 6.53, czyli występowała relaksacja częściowa do określonej wartości. W każdym analizowanym przypadku mastyksu zaobserwowano największe wartości $E_0 \cdot \epsilon_0$ dla mastyksów na bazie asfaltu 50/70. Przyrost zawartości kopolimeru w analizowanym mastyksie w większości przypadków powoduje zmniejszenie wartości naprężenia w warunkach stałego odkształcenia ϵ_0 . Największą wartość odnotowano dla lepszca o największej zawartości kopolimeru SBS, tj. asfaltu modyfikowanego 9%SBS (59,6 kPa). Natomiast, co warto zauważyć, mastyksy z udziałem różnych wypełniaczy i asfaltów modyfikowanych uzyskały zbliżone charakterystyki $E_0 \cdot \epsilon_0$, nie odnotowano wyraźnego wpływu wypełniacza mineralnego na wartość tego parametru.

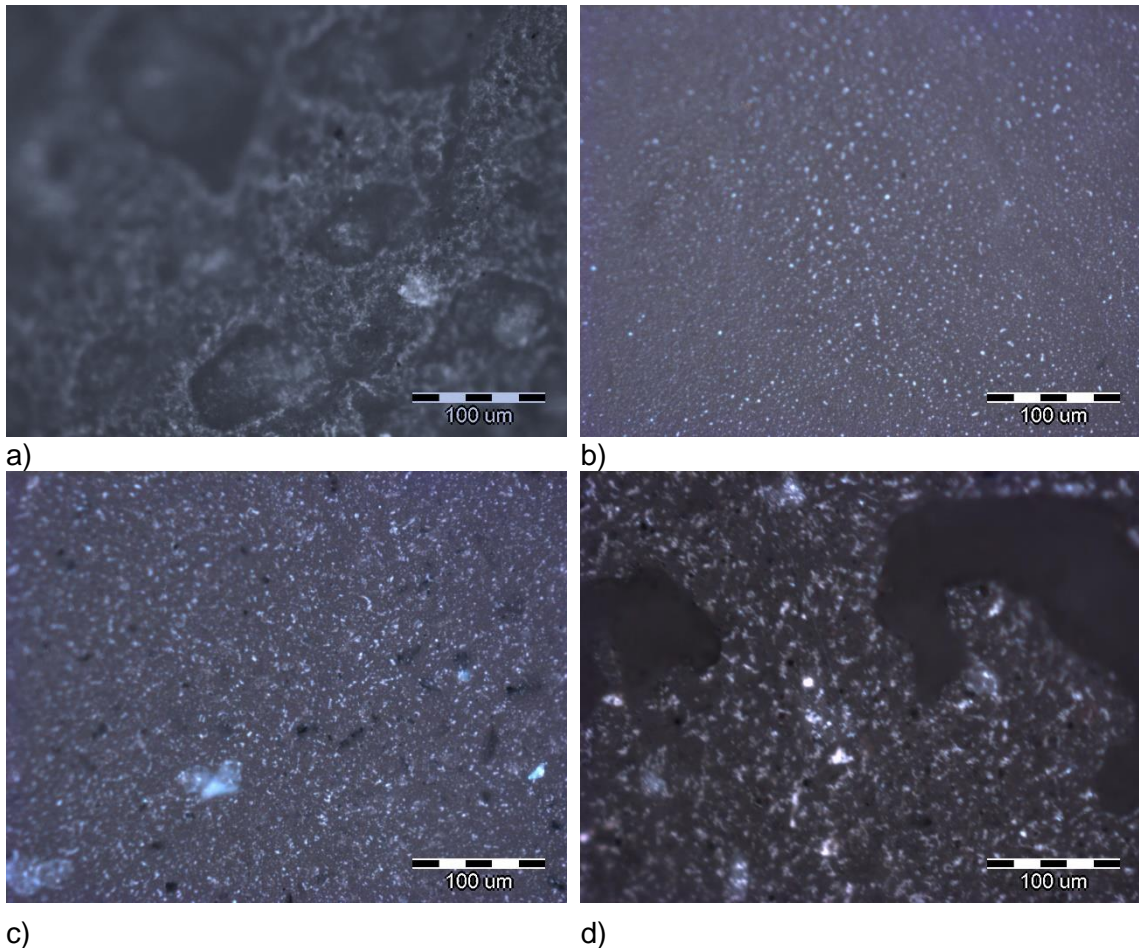


Rys. 6.53. Wartości parametru $E_0 \cdot \epsilon_0$ dla modelu czteroparametrowego z dziedzina t^β

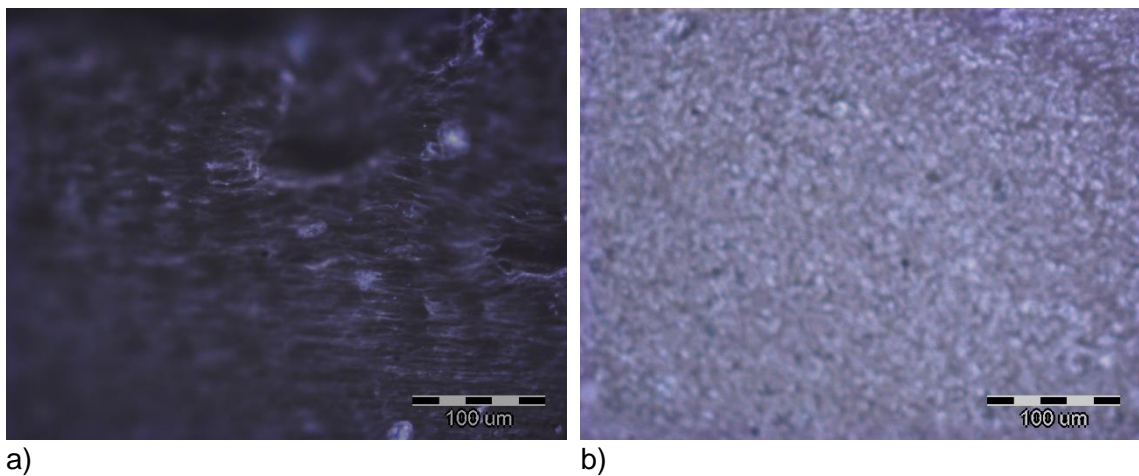
6.6 Ocena morfologii asfaltów modyfikowanych i mastyksów na podstawie obrazów mikroskopowych

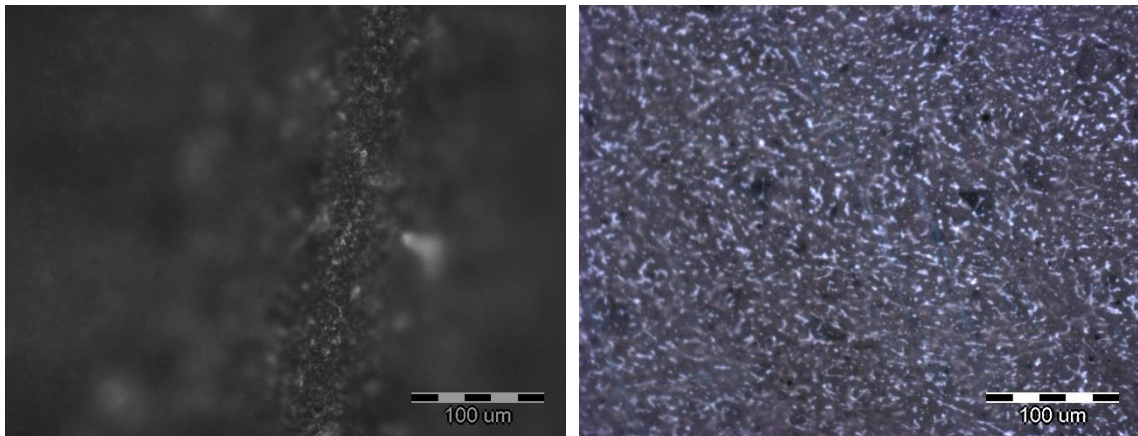
Obrazy mikroskopowe wykonano za pomocą mikroskopu wyposażonego w kamerę UV. Metodyka badania została opisana szczegółowo w pkt. 5.4. Wykonano fotografie zarówno dla asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS jak i mastyksów sporządzonych z ich udziałem. Każdy z rys. 6.51 – 6.61 zawiera fotografie asfaltu bazowego oraz trzech mastyksów sporządzonych z jego udziałem. Każda fotografia została wykonana przy powiększeniu 200 krotnym (zastosowany obiektyw 20x). Analizując fotografie asfaltów modyfikowanych 3%SBS i 5%SBS można zauważyć, iż polimer występuje w postaci pojedynczych skupisk, stanowiąc fazę rozproszoną, natomiast to asfalt w tych przypadkach stanowi fazę rozpraszającą. Natomiast przyrost zawartości kopolimeru SBS w strukturze asfaltu modyfikowanego sprawia, że struktura ta jest zupełnie odwrócona. W przypadku asfaltów modyfikowanych 7%SBS oraz 9%SBS można zaobserwować ciągłą sieć polimeru stanowiącą fazę rozpraszającą, tutaj zaś asfalt stanowi fazę rozproszoną. Utworzenie się ciągłej fazy kopolimeru SBS w asfalcie modyfikowanym 7%SBS, oraz jej brak w asfalcie modyfikowanym 5%SBS, może świadczyć o polepszeniu się właściwości reologicznych tych asfaltów w przeprowadzonych badaniach. Podobną

prawidłowość zaobserwowano w asfaltach poddanych starzeniu RTFOT, gdzie ciągłą fazę polimerową stwierdzono zauważamy dopiero dla asfaltu modyfikowanego o zawartości

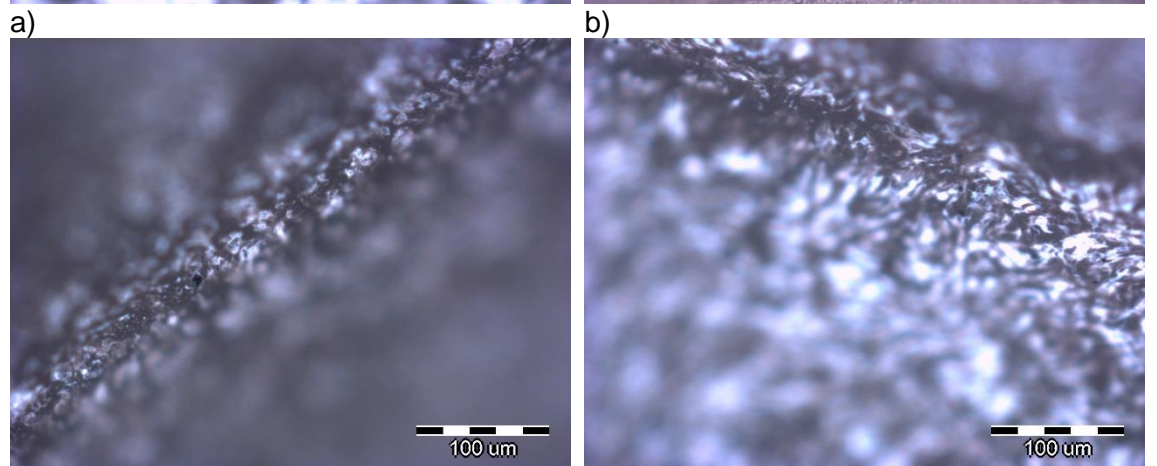
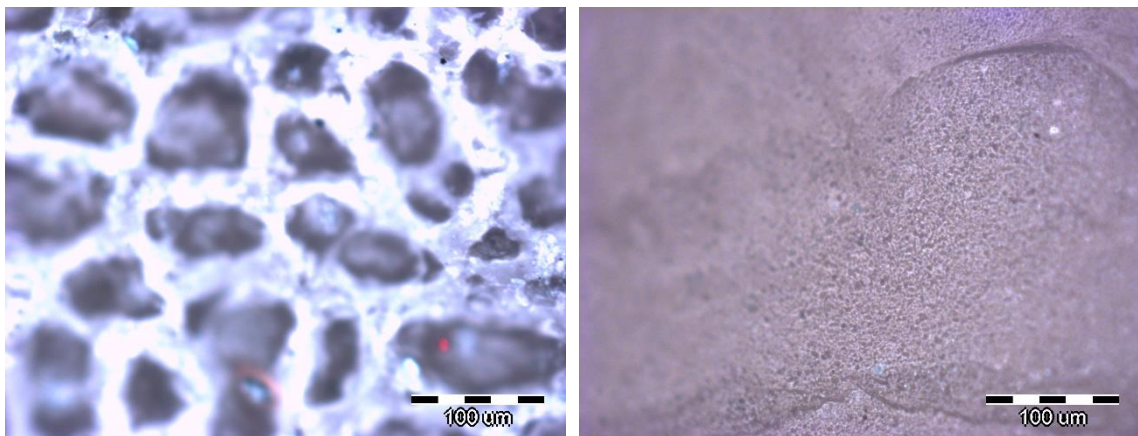


Rys.6.54 Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 3%SBS (a) oraz mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego 3%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d)

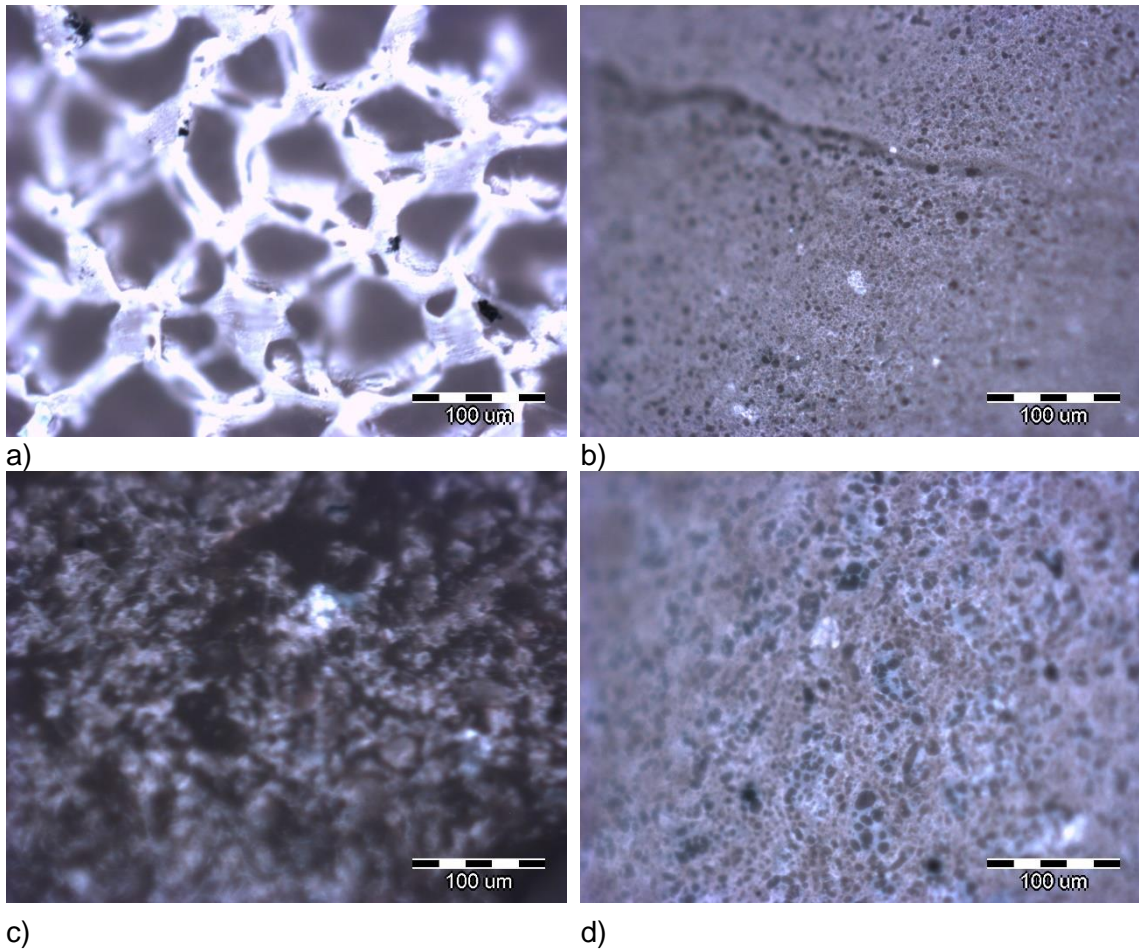




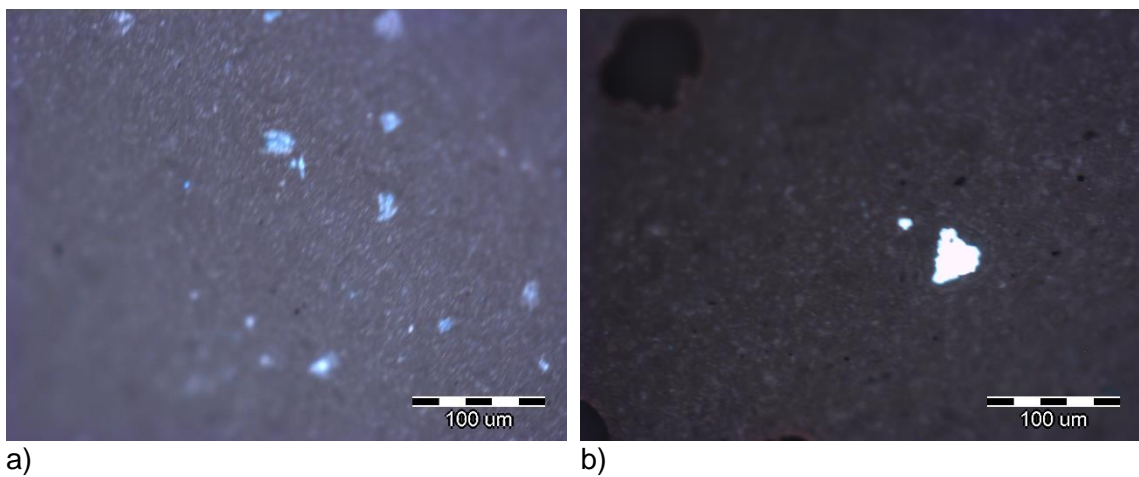
c) d)
Rys.6.55. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 5%SBS (a) oraz mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego 5%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d)

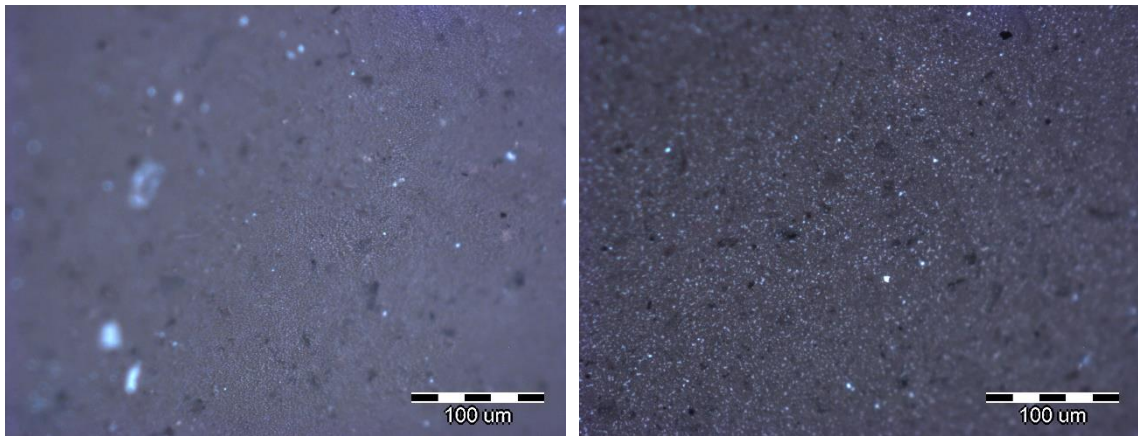


c) d)
Rys.6.56. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 7%SBS (a) oraz mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego 7%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d)

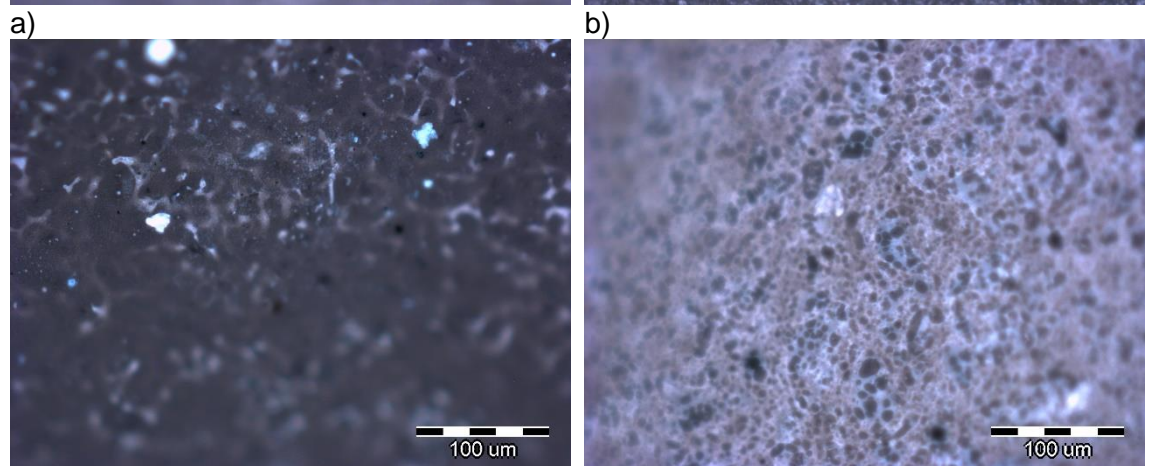
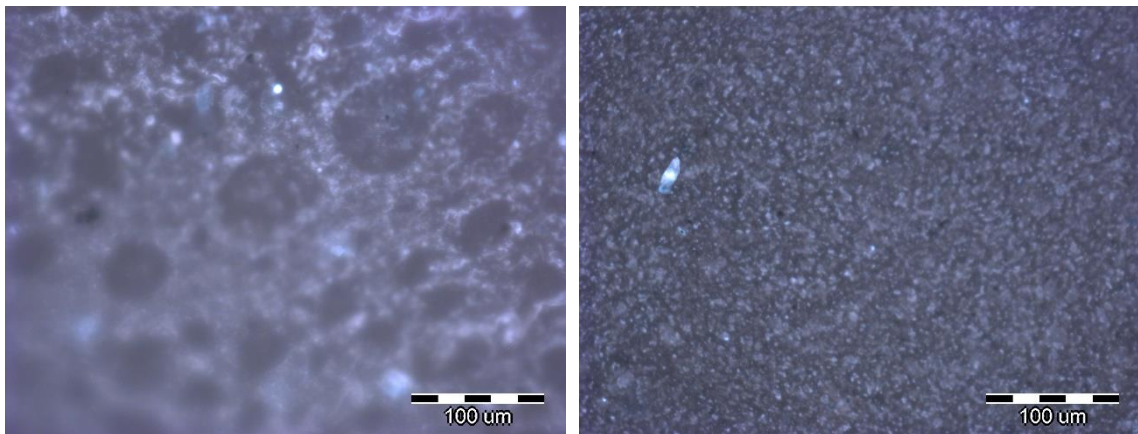


Rys.6.57. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 9%SBS (a) oraz mastyków z udziałem asfaltu modyfikowanego 9%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d)

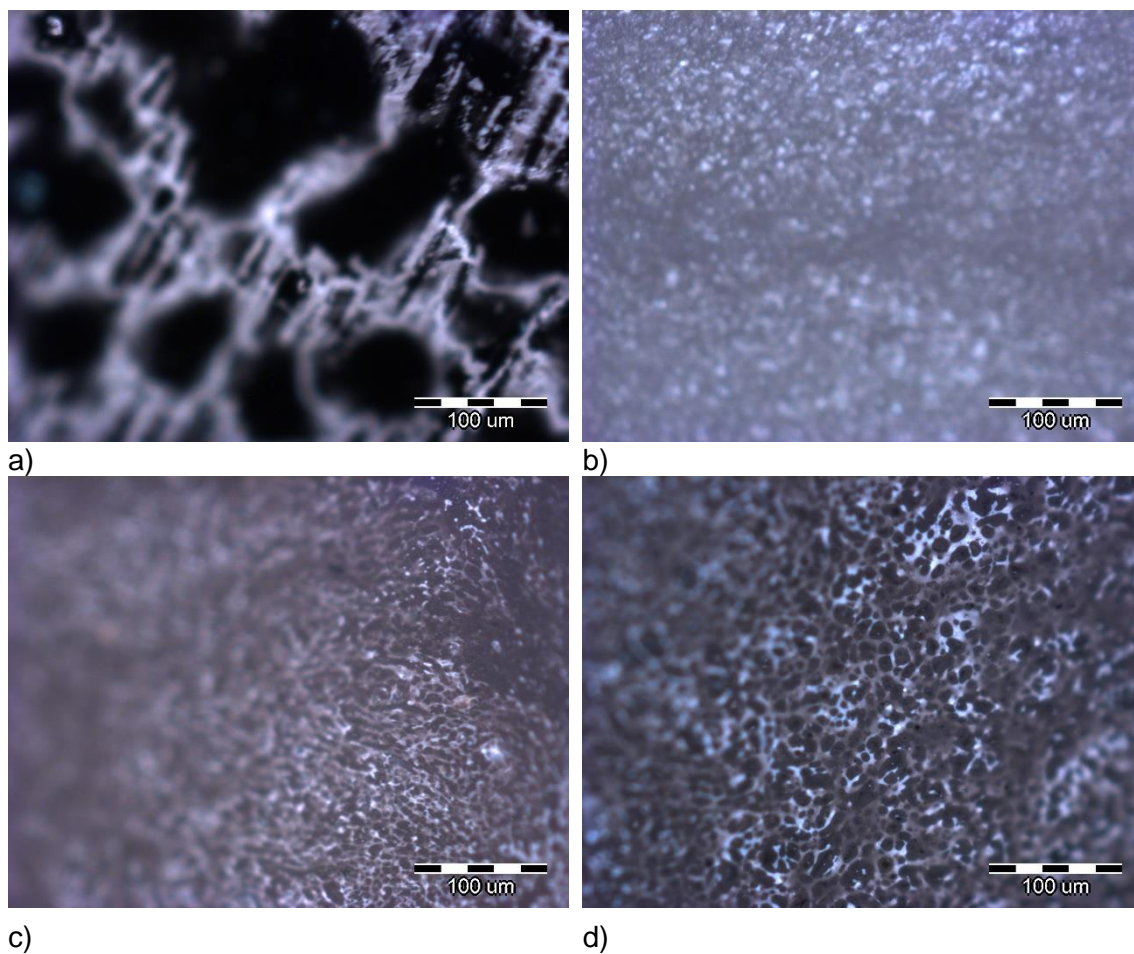




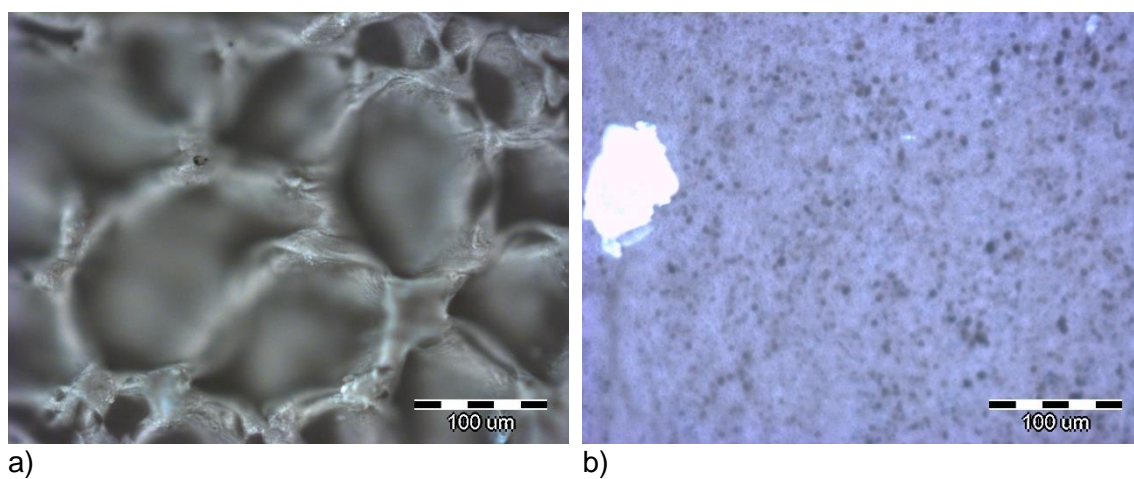
c) d)
Rys.6.58. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 3%SBS (a) oraz mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego 3%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d) poddanych starzeniu RTFOT

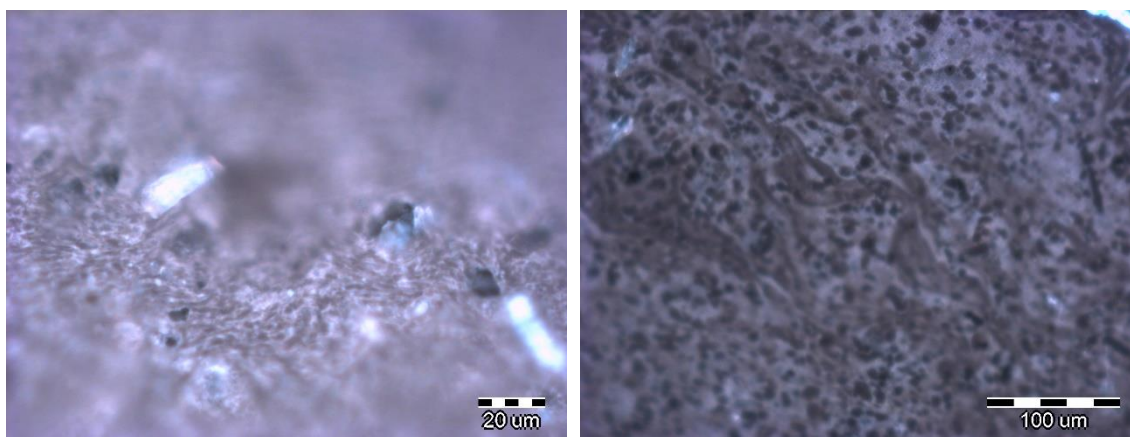


c) d)
Rys.6.59. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 5%SBS (a) oraz mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego 5%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d) poddanych starzeniu RTFOT



Rys.6.60. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 7%SBS (a) oraz mastyków z udziałem asfaltu modyfikowanego 7%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d) poddanych starzeniu RTFOT





c) d)
Rys.6.61. Obrazy mikroskopowe morfologii asfaltu modyfikowanego o zawartości 9%SBS (a) oraz mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego 9%SBS i wypełniacza wapiennego (b), bazaltowego (c) oraz granodiorytowego (d) poddanych starzeniu RTFOT

kopolimeru 7% i 9% SBS. Analizując rys.6.60 i 6.61 przedstawiające mastyksy z udziałem asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS zawierające 7% i 9% kopolimeru SBS, można zaobserwować ciągłość obu faz, zarówno asfaltowej jak i polimerowej. Dodatkowo obszary kopolimeru są bardziej rozproszone, o nieregularnym kształcie i mniejszych wymiarach. Natomiast mastyksy z udziałem asfaltów modyfikowanych 3%SBS oraz 5%SBS mają ciągłą fazę asfaltową, tylko pojedyncze struktury wskazujące na obecność kopolimeru.

Na podstawie normy PN-EN 13636 wg kodu literowego można powyższe układy polimer-asfalt przedstawić zgodnie z tabelą 6.18. Nie wykonano zdjęć dla asfaltu 50/70 oraz mastyksów sporządzonych z jego udziałem, ponieważ niemożliwe było uzyskanie odbicia światła UV, w związku z brakiem obecności polimeru.

Tab.6.18. Zestawienie parametrów opisujących strukturę elastomeru w asfalcie

Badany materiał	Ciągłość fazy	Jednorodność	Rozmiar	Kształt
3%SBS	B	H	S	r
5%SBS	B	H	S/M	r
7%SBS	P	I	S/L	r
9%SBS	P	I	L	r
3%SBS RTFOT	B	H	S	r
5%SBS RTFOT	B	H	S/M	r
7%SBS RTFOT	P	I	S/L	r
9%SBS RTFOT	P	I	L	r

6.7. Analiza korelacji pomiędzy właściwościami strukturalnymi wypełniacza a parametrami funkcjonalnymi mastyksów asfaltowych przed i po starzeniu metodą RTFOT

Określając zależności pomiędzy poszczególnymi zmiennymi dokonano obliczeń prostych współczynników korelacji dla właściwości strukturalnych wypełniaczy mineralnych (tzn. powierzchnia właściwa P_w oraz zawartość wolnej przestrzeni RV) oraz właściwości funkcjonalnych badanych mastyksów asfaltowych. Analizowano penetrację w temperaturze 25°C , przyrost temperatury mięknięcia wg metody „Pierścień i kula”, parametr charakteryzujący odporność na koleinowanie tzn. wskaźnik odkształcalności $|G^*|/\sin\delta$ wyznaczony w temperaturze 70°C oraz parametry testu MSCR, tj. J_{nr} (nieodwracalna podatność na pełzanie) oraz R (procentowy nawrót) dla porównania również wykorzystano dane uzyskane w temperaturze 70°C . Dane do obliczeń przygotowano jako pary liczb określających wartości analizowanych charakterystyk Y_i i X_i dla kolejnych próbek wypełniaczy $i=1,2, \dots, n$, które były poddawane badaniom laboratoryjnym. Jako zmienne Y_i zostały przyjęte właściwości strukturalne analizowanych wypełniaczy (wapiennego, bazaltowego oraz granodiorytowego), natomiast X_i stanowiły właściwości funkcjonalne utworzonych mastyksów asfaltowych. Dla każdego z asfaltów bazowych tj. 50/70, 3%SBS, 5%SBS, 7%SBS oraz 9%SBS dokonano analizy korelacji zarówno przed jak i po procesie starzenia metodą RTFOT (tab. 6.18.-6.22.).

Do oceny siły korelacji pomiędzy rozpatrywanymi właściwościami, przyjęto następujące kryteria współczynników r Pearsona, otrzymany wynik r może osiągać wartości od -1 do 1, $r = 1$ lub $r = -1$ oznacza idealną korelację między zmienną A i B , $r = 0$ oznacza brak występowania korelacji.

Minimalne wartości współczynnika korelacji w zależności od liczby stopni swobody oraz poziomu istotności są następujące [Szydłowski, 1974]:

- ✓ przy poziomie istotności $\alpha=0,05$
 - dla liczby pomiarów 2, $r = 0,95$
 - dla liczby pomiarów 3, $r = 0,88$
 - dla liczby pomiarów 4, $r = 0,81$

- ✓ przy poziomie istotności $\alpha=0,1$
 - dla liczby pomiarów 2, $r = 0,90$
 - dla liczby pomiarów 3, $r = 0,81$
 - dla liczby pomiarów 4, $r = 0,73$

Tab. 6.19. Współczynniki korelacji dla mastyksów z asfaltem 50/70 przed i po starzeniu RTFOT

		50/70				
		Pen _{25°C} mm/10	ΔT_{PIK} °C	$ G^* /\sin\delta$ kPa	J _{nr} 1/kPa	R %
Pw	cm ² /g	0,86	0,43	-0,06	-0,37	0,12
RV	%	-0,82	-0,49	0,13	0,43	-0,19
		50/70 RTFOT				
Pw	cm ² /g	0,75	-0,89	-0,61	0,15	-0,39
RV	%	-0,70	0,86	0,67	-0,08	0,32

Analizując mastyksy z udziałem asfaltu 50/70 przed oraz po starzeniu RTFOT (tab. 6.19), można zaobserwować na podstawie współczynników korelacji, silne powiązanie pomiędzy powierzchnią właściwą i zawartością wolnej przestrzeni wypełniacza a penetracją w temperaturze 25 °C, zarówno przed jak i po starzeniu, natomiast zależność silną oznaczono dla mastyksów po starzeniu. Wraz ze przyrostem wartości powierzchni właściwej wzrasta wartość penetracji mastyksu, natomiast przyrost zawartości wolnych przestrzeni powoduje spadek przyrostu temperatury mięknienia. Dla wskaźnika koleinowania, nieodwracalnej podatności na pełzanie J_{nr} oraz R zaobserwowano słabą korelację.

Tab. 6.20. Współczynniki korelacji dla mastyksów z asfaltem modyfikowanym 3%SBS przed i po starzeniu RTFOT

		3%SBS				
		Pen _{25°C} mm/10	ΔT_{PIK} °C	$ G^* /\sin\delta$ kPa	J _{nr} 1/kPa	R %
Pw	cm ² /g	0,99	-0,99	-0,69	0,79	-0,79
RV	%	-0,99	0,99	0,74	-0,75	0,75
		3%SBS RTFOT				
Pw	cm ² /g	0,99	-0,98	0,63	0,18	0,72
RV	%	-0,99	0,96	-0,57	-0,26	-0,66

W przypadku mastyksów z udziałem asfaltu o zawartości kopolimeru SBS równej 3%, przedstawionych w tab.6.20, zauważono bardzo silną korelację pomiędzy Pw oraz RV a penetracją i przyrostem temperatury mięknięcia. Silną korelację odnotowano również dla parametrów J_{nr} oraz R ($r > 0,75$) przed starzeniem, przyrost wartości powierzchni właściwej skutkuje przyrostem podatności nieodwracalnej J_{nr} oraz spadkiem R.

Tab. 6.21. Współczynniki korelacji dla mastyksów z asfaltem modyfikowanym 5%SBS przed i po starzeniu RTFOT

		5%SBS				
		Pen _{25°C} mm/10	ΔT_{PiK} °C	$ G^* /\sin\delta$ kPa	J_{nr} 1/kPa	R %
Pw	cm ² /g	0,89	0,63	-0,35	-0,29	-0,30
RV	%	-0,92	-0,68	0,41	0,22	0,22
		5%SBS RTFOT				
Pw	cm ² /g	1,00	-0,97	-0,04	1,00	-0,92
RV	%	-1,00	0,95	-0,04	-0,99	0,89

Analizując tab.6.21. współczynniki korelacji dla mastyksów utworzonych z udziałem asfaltu modyfikowanym 5%SBS, można również zaobserwować bardzo silną korelację pomiędzy powierzchnią właściwą i zawartością wolnej przestrzeni a analizowaną penetracją (przed i po starzeniu) oraz Δ temperatury mięknięcia po starzeniu RTFOT. Odnotowano również silną korelację pomiędzy właściwościami strukturalnymi a parametrami testu MSCR.

Tab. 6.22. Współczynniki korelacji dla mastyksów z asfaltem modyfikowanym 7%SBS przed i po starzeniu RTFOT

		7%SBS				
		Pen _{25°C} mm/10	ΔT_{PiK} °C	$ G^* /\sin\delta$ kPa	J_{nr} 1/kPa	R %
Pw	cm ² /g	0,99	-0,92	0,40	-0,93	-0,84
RV	%	-0,98	0,89	-0,33	0,90	0,80
		7%SBS RTFOT				
Pw	cm ² /g	0,93	-0,99	0,58	0,99	0,05
RV	%	-0,90	0,98	-0,52	-0,99	-0,12

W przypadku mastyksów sporządzonych z udziałem asfaltu modyfikowanego o zawartości kopolimeru SBS równej 7% (tab. 6.22), zaobserwowano bardzo silne korelacje pomiędzy właściwościami strukturalnymi zastosowanych wypełniaczy a penetracją, przyrostem temperatury mięknięcia oraz parametrami lepizcza wyznaczonymi w teście MSCR (J_{nr}) zarówno przed jak i starzeniu metodą RTFOT.

Tab. 6.23. Współczynniki korelacji dla mastyksów z asfaltem modyfikowanym 9%SBS przed i po starzeniu RTFOT

		9%SBS				
		Pen _{25°C} mm/10	ΔT_{PiK} °C	$ G^* /\sin\delta$ kPa	J_{nr} 1/kPa	R %
Pw	cm ² /g	0,99	-0,09	0,64	-0,62	1,00
RV	%	-0,97	0,02	-0,70	0,56	-1,00
		9%SBS RTFOT				
Pw	cm ² /g	0,93	-0,86	0,92	0,99	-0,14
RV	%	-0,90	0,81	-0,95	-0,99	0,21

Dla mastyksów z udziałem asfaltu modyfikowanego o zawartości kopolimeru SBS równej 9%, zaobserwowano, iż właściwości reologiczne mastyksów wykazują największą korelację z właściwościami strukturalnymi spośród wszystkich badanych mastyksów. Zwłaszcza przy zależności powierzchni właściwej a procentowym nawrotem R oraz penetracją w temperaturze 25°C. Tylko w tym przypadku odnotowano korelację pomiędzy właściwościami strukturalnymi wypełniacza a wskaźnikiem koleinowania $|G^*|/\sin\delta$. W przypadku mastyksów o zawartości kopolimeru SBS 3%, 7% oraz 9% zauważono silną korelację pomiędzy powierzchnią właściwą zastosowanego wypełniacza a parametrami wyznaczonymi w teście MSCR.

6.8. Dyskusja

- **Wpływ zastosowanych wypełniaczy mineralnych oraz zawartość kopolimeru SBS w asfalcie bazowym na zmiany właściwości powstałych mastyksów**

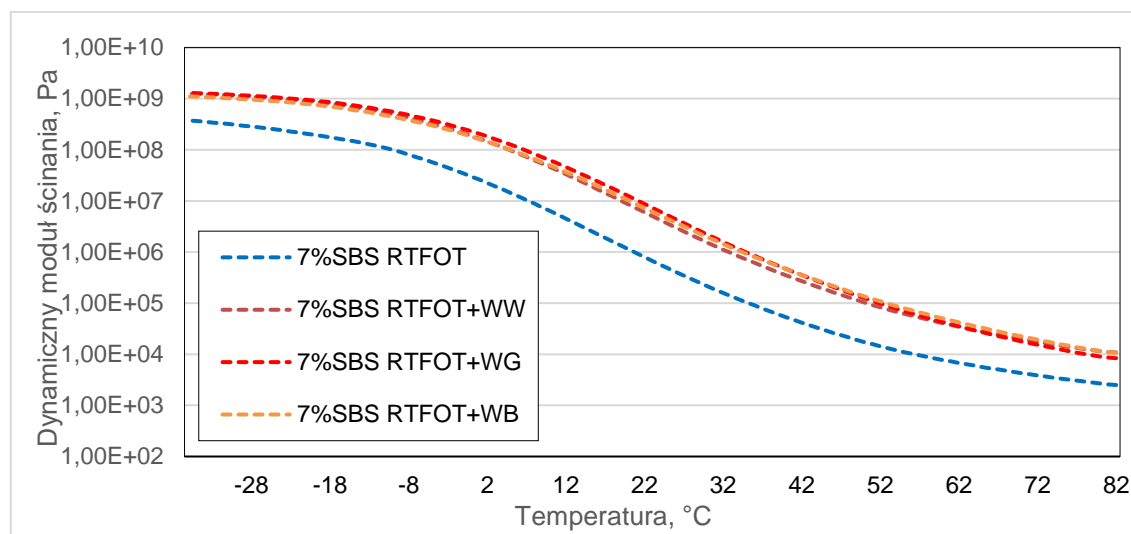
Głównym celem badań była analiza wpływu wypełniaczy (wapienny, bazaltowy i granodiorytowy) oraz kopolimeru SBS na zmianę właściwości sporządzonych mastyksów asfaltowych. Zaczynając od podstawowych właściwości mastyksów asfaltowych tj. temperatury mięknięcia wg metody „Pierścień i kula” oraz penetracji w temperaturze 25°C można zauważyć, iż w każdym analizowanym przypadku dodatek wypełniacza spowodował zwiększenie sztywności powstałego mastyksu. Widoczny jest wyraźny przyrost temperatury mięknięcia oraz mniejsze wartości penetracji w temperaturze 25°C. Analizując wartości ΔT_{PIK} widoczne jest wyraźne obniżenie wartości przyrostów temperatury mięknięcia mastyksów w stosunku do asfaltu bazowego, dla asfaltów modyfikowanych o zawartości kopolimeru 5%SBS i więcej. Wiąże się to z powstaniem ciągłej sieci polimerowej w tych asfaltach. Ponadto wypełniacz wapienny wykazuje w tych przypadkach najmniejszym oddziaływanie usztywniającym na powstały mastyks asfaltowy, jednak trzeba podkreślić, że pozostałe wypełniacze również mieściły się w wymaganym zakresie $\Delta T_{PIK} < 25^{\circ}\text{C}$. Największy wpływ na usztywnienie mastyksu odnotowano w przypadku wypełniacza bazaltowego. Jeśli chodzi o wartości penetracji, również zauważalny jest wpływ wypełniacza na zmianę twardości mastyksów. W każdym analizowanym przypadku nastąpiło zmniejszenie wartości penetracji. Im asfalt bazowy ma większą zawartość kopolimeru SBS, tym różnice w penetracji mastyksów z różnymi wypełniaczami są mniejsze. Dodatek wypełniacza do asfaltu powoduje jego usztywnienie, co również przekłada się na znaczny przyrost dynamicznego modułu ścinania, zwłaszcza w wysokich temperaturach. W asfaltach bazowych tj. 50/70 i niskomodyfikowanych jest widoczny przyrost $|G^*|$ nawet o jeden rząd wielkości w stosunku do asfaltu bazowego. Różnica ta zanika w przypadku asfaltów bazowych o zawartości kopolimeru SBS 5% i więcej. W niskich temperaturach dynamiczny moduł ścinania, w analizowanych przypadkach, dąży asymptotycznie do zbliżonych wartości, bez względu na zastosowany wypełniacz. Można wnioskować, iż w niskich temperaturach na

właściwości reologiczne mastyksu głównie ma wpływ zastosowany asfalt bazowy a nie wypełniacz. Zmiany dynamicznego modułu ścinania bardziej widoczne są w wysokich temperaturach. Jeśli chodzi o wartości kąta przesunięcia fazowego, również zauważalna jest obecność wypełniacza, jeśli chodzi o charakterystykę lepkosprężystą. Zastosowany wypełniacz spowodował, że bardziej zarysowana jest część sprężysta w porównaniu z asfaltem bazowym. Najbardziej widoczne zmiany wpływające na sztywność mastyksu na podstawie kąta przesunięcia fazowego były zauważalne w przypadku wypełniacza granitowego. W każdym analizowanych mastyksie dodatek wypełniacza zwiększa górną wartość temperaturowego zakresu lepkosprężystości, co może mieć wpływ na lepszą odporność MMA na koleinowanie, co zobrazowano wynikami zmniejszonej wartości nieodwracalnej podatności J_{nr} w teście MSCR. Najmniejsze różnice w zmianach krzywych relaksacji w temperaturze -12°C odnotowano w mastyksach sporządzonych na bazie asfaltu modyfikowanego o zawartości kopolimeru 5%SBS i więcej. Na podstawie badań mastyksów można wnioskować, iż o odporności na spękania niskotemperaturowe MMA kluczowe znaczenie ma zastosowany kopolimer SBS.

- **Wpływ starzenia technologicznego metodą RTFOT na zmiany właściwości mastyksów**

Zjawisko starzenia w lepiszczach asfaltowych ponaftowych jak i modyfikowanych polimerami jest znane, natomiast celem badań była analiza wpływu starzenia na właściwości reologiczne sporządzonych mastyksów. Starzenie wpływa na znaczne usztywnienie asfaltu, w przypadku mastyksów zaobserwowano podobną zależność. Nastąpił przyrost temperatury mięknięcia, zaś w przypadku asfaltu bazowego 3%SBS znacznie powyżej $\Delta T_{PIK} > 25^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{PIK} = 26,9^{\circ}\text{C}$ odnotowano dla mastyksu 3%SBS RTFOT+WB. Poprzez zmianę sztywności mastyksu po starzeniu metodą RTFOT nastąpiło zmniejszenie wartości penetracji w temperaturze 25°C . Najbardziej usztywniające oddziaływanie odnotowano dla wypełniacza bazaltowego, w każdym analizowanym przypadku mastyks z jego udziałem uzyskał mniejsze wartości penetracji. Zmiana konsystencji mastyksów w stosunku do asfaltu bazowego po starzeniu metodą RTFOT widoczna jest również w przypadku dynamicznego modułu ścinania –

zaobserwowano wyraźny przyrost $|G^*|$ w zakresie temperatur eksploatacyjnych. Natomiast trudno wyraźnie wskazać, który z wypełniaczy ma największe oddziaływanie usztywniające.



Rys. 6.62. Wykres zależności dynamicznego modułu ścinania od temperatury dla asfaltu 7%SBS RTFOT i mastyksów sporządzonych z jego udziałem

Dla przykładu na rys. 6.62. przedstawiono zależność dynamicznego modułu ścinania $|G^*|$ od temperatury dla asfaltu o zawartości kopolimeru SBS równej 7% oraz mastyksów z jego udziałem. Wyraźnie widoczny jest przyrost sztywności wyrażony poprzez $|G^*|$, porównując asfalt bazowy z mastyksami, natomiast poddając analizie mastyksy widoczna jest zbliżona charakterystyka w całym zakresie temperatur dla wszystkich analizowanych mastyksów. Można wnioskować, iż w przypadku asfaltów o zawartości kopolimeru SBS równej 5% i więcej wypełniacz tradycyjnie stosowany wapienny jak i pozostałe wypełniacze mineralne, w tym przypadku bazaltowy i granodiorytowy, wykazują bardzo zbliżoną charakterystykę lepkosprężystą. Można zauważyć, iż relaksacja naprężeń w mastyksach z udziałem asfaltów bazowych po starzeniu technologicznym uległa stabilizacji. Analizowane mastyksy wykazują zbliżoną zdolność do relaksacji naprężeń w przypadku asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS. Świadczy to o pozytywnym wpływie zastosowanego polimeru w mastyksach, tym samym potwierdza tezę iż dodatek polimeru w mastyksie zmniejsza nadmierne oddziaływanie usztywniające, również po starzeniu RTFOT.

- **Ocena przydatności modeli reologicznych do opisu relaksacji w mastyksach i asfaltach modyfikowanych kopolimerem SBS**

Zjawisko relaksacji obserwowano w teście rozciągania w duktylometrze w temperaturze -12°C w warunkach stałego odkształcenia opisano za pomocą zmodyfikowanego modelu reologicznego składającego się z elementów Maxwella i Hooke'a połączonych równolegle, przy czym wprowadzono dodatkową zmienną β , będącą wykładnikiem potęgi czasu (dziedzina t^{β}). W każdym analizowanym przypadku odnotowano dopasowanie do wyników eksperymentu charakteryzowane za pomocą współczynnika determinacji na poziomie $R^2 > 0,999$. Dodatkowo, analizując parametry modelu zauważono, iż wartości naprężenia nie dążyły do zera, lecz dążą asymptotycznie do wartości $E_0 \cdot \varepsilon_0$. Natomiast, co warto zauważyć, mastyksy asfaltowe z udziałem różnych wypełniaczy i asfaltów modyfikowanych uzyskały zbliżone charakterystyki $E_0 \cdot \varepsilon_0$, nie odnotowano w tym przypadku wyraźnego wpływu zastosowanego wypełniacza mineralnego.

7. WNIOSKI

Program badań zrealizowany w niniejszej dysertacji obejmował samodzielne sporządzenie próbek zarówno asfaltów modyfikowanych kopolimerem SBS, jak i mastyksów asfaltowych, w celu zapewnienia znanych i stałych parametrów uzyskanych lepiszczy asfaltowych.

Wykonane badania laboratoryjne oraz analiza ich rezultatów upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- Wszystkie badane asfalty modyfikowane zawierające kopolimer SBS wykazują właściwości lepkosprężyste w szerokim zakresie temperatur eksploatacyjnych, co potwierdzają badania wykonane przy użyciu reometru dynamicznego ścinania DSR w zakresie temperatury od -36°C do 82°C . Mastyksy asfaltowe sporządzone z udziałem asfaltów modyfikowanych, poprzez obecność polimeru (SBS) w ich strukturze, wykazują znaczne polepszenie właściwości sprężystych w stosunku do asfaltu drogowego (niemodyfikowanego) 50/70, co potwierdza postawioną tezę. Dodatkowo należy podkreślić, iż wypełniacze bazaltowy i granodiorytowy zastosowane w mastyksach, uzyskują podobną charakterystyką reologiczną, jak tradycyjnie stosowany wypełniacz wapienny.
- Ciągła sieć polimerowa występująca w asfaltach modyfikowanych o zawartości kopolimeru równej 5%SBS i więcej, powoduje polepszenie właściwości reologicznych mastyksów, co przekłada się na wyraźne zmniejszenie oddziaływania usztywniającego zastosowanego wypełniacza.
- Zastosowanie kopolimeru SBS znacznie przyczynia się do zmniejszenia podatności badanych mastyksów asfaltowych na powstawanie odkształceń trwałych, co ma odzwierciedlenie w przyroście wartości wskaźnika koleinowania.
- Analiza statystyczna właściwości strukturalnych (powierzchnia właściwa, zawartość wolnej przestrzeni) zastosowanych wypełniaczy mineralnych wykazała korelację z właściwościami reologicznymi mastyksów, tj. penetracja w temperaturze 25°C , przyrost temperatury mięknięcia wg metody „Pierścień i Kula” oraz parametry testu MSCR. Tym samym udowodniono postawioną

tezę istnienia korelacji pomiędzy właściwościami strukturalnymi wypełniaczy mineralnych, a właściwościami reologicznymi mastyksów.

- Zastosowanie uogólnionych modeli reologicznych do opisu zjawiska relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w analizowanych mastyksach pozwala w precyzyjny sposób odwzorować krzywe relaksacji wyznaczone podczas eksperymentu, potwierdzają to wartości współczynnika determinacji R^2 w każdym przypadku większe od 0,99.

Kierunki dalszych prac badawczych:

- Badania laboratoryjne „mastyksów mieszanych”, tzn. utworzonych na podstawie połączenia asfaltu i wypełniacza mieszanego w różnych proporcjach wypełniacz/asfalt. W niniejszej rozprawie doktorskiej badaniom zostały poddane wypełniacze „czyste” tzn. niepołączone z wypełniaczem wapiennym. W następnym kroku badawczym planuje się stworzenie mieszanin tych wypełniaczy w różnych proporcjach i sprawdzenie ich właściwości reologicznych. W ten sposób będzie można zaproponować rozwiązania, zgodnie z normami i wytycznymi podczas produkcji MMA.
- Stworzenie receptur MMA wykorzystując wypełniacze mineralne oraz ocena właściwości użytkowych mieszanek mineralno-asfaltowych, tj. odporności na powstawanie odkształceń trwałych czy spękań niskotemperaturowych, w stosunku do mieszanki mineralno-asfaltowej z wypełniaczem wapiennym.
- Wykonanie badań mastyksów z uwzględnieniem czynnika starzenia długookresowego (eksploatacyjnego) w analizowanych materiałach, wg. metody PAV.

BIBLIOGRAFIA

- AASHTO MP 19-10 Standard Specification for Performance-Graded asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test.
- Airey G.D. Rheological properties of styrene butadiene styrene polimer modified road bitumens, *Fuel*, 2003, 82, s. 1709-1719.
- Airey G.D. State of the Art. Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials, *The International Journal of Pavement Engineering*, 2003, Vol. 4(3), s. 165-176.
- Airey G.D. Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data, *Road Materials and Pavement Design*, 2002, 3:4, s. 403-424, DOI: 10.1080/14680629.2002.9689933.
- Anderson M. Asphalt Binder Characteristics Affecting Durability Cracking, 11th Arizona Pavements/Materials Conference, November 19-20, 2014.
- Andrzejczak K. Zmiany wzrostu wskaźnika nasycenia samochodami osobowymi. *Wiadomości Statystyczne*, 2012, t. 11, s. 22-33.
- Babiak M., Bilski M., Ratajczak M., Kosno J. Wpływ modyfikatorów z przetworzonych tłuszczów na właściwości lepkosprężyste asfaltów, *Materiały budowlane*, 2017, nr 8, s. 49-51.
- Bilski M. Właściwości reologiczne asfaltów drogowych modyfikowanych dodatkiem asfaltów naturalnych z uwzględnieniem wpływu starzenia. *Rozprawa doktorska*. Poznań 2017.
- Bilski M., Machowiak K., Wilmański A. Wpływ właściwości fizykochemicznych kruszyw mineralnych na adhezję lepiscza asfaltowego do ich powierzchni, *Przyrodnicze i geotechniczne aspekty budownictwa*, Poznań, 2020, s. 33-46.
- Błażejowski K., Styk S. *Technologia warstw bitumicznych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2004.
- Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M., Baranowska W., Ostrowski P. *Poradnik asfaltowy 2021*, Orlen Asphalt sp. Z o.o., Polska 2021.
- Bodnar A., Chrzanowski M., Latus P. *Reologia konstrukcji prętowych: podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych*. Kraków. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2006.
- Cardone F., Frigio F., Ferrotti G., Canestrari F. Influence of mineral fillers on the rheological response of polimer-modified bitumens and mastics. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2015, Vol. 2. Issue 6, s. 373-31.
- Cuciniello G., Leandri P., Filippi S., Lo Presti D., Polacco G., Losa M., Airey G. Microstructure and rheological response of laboratory-aged SBS-modified bitumens, *Road Materials and Pavement Design*, 2021, 22:2, s. 372-396, DOI: 10.1080/14680629.2019.1621771.
- D'Angelo J. The Relationship of the MSCR Test to Rutting. *Road Materials and Pavement Design*, 2010, s. 61-80.
- Faheem A.F., Bahia H.U. Modeling of Asphalt Mastic in Terms of Filler-Bitumen Interaction, *Road Materials and Pavement Design*, 2010t.11, nr 1, s. 281-303.

- Gawęł I., Kalabinska M., Piłat J. Asfalty drogowe, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa 2014.
- Gawęł I., Niczke Ł., Krosno J., Naraniecki B. Anti-ageing additives to bitumen, Przemysł Chemiczny 93/5, 2014.
- Grabowski W. Struktura a właściwości funkcjonalne wypełniaczy mineralnych stosowanych w drogownictwie, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. 2007.
- Grabowski W., Słowik M., Wilanowicz J., Soból T. Właściwości strukturalne i funkcjonalne wypełniaczy z instalacji odpylania gazów wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Budownictwo Lądowe, 2006, Nr 60, s. 161-168.
- Grabowski W., Wilanowicz J. The specific surface of mineral fillers and their functional properties, e-Proceedings of the 5th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, 2011a ,1, ss. 246-255.
- Grabowski W., Wilanowicz J. The structure of mineral fillers and their stiffening properties in filler-bitumen mastics, Materials and Structures, 2008, 41(4), s. 793-804.
- Grabowski W., Wilanowicz J. Wpływ powierzchni właściwej wypełniaczy mineralnych na ich właściwości funkcjonalne w kompozytach mineralno-asfaltowych. Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej, 2011, Nr 9, s. 5-14.
- Grabowski, W., Wilanowicz, J., Andrzejczak, M., Bilski, M. Warunki zastosowania popiołu lotnego jako wypełniacza do mieszanek mineralno-asfaltowych. 2014. Budownictwo i Architektura, 13(1).
- Isacsson U., Lu X. Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers, Journal Of Materials Science, 1999, 34, s. 3737-3745.
- Isacsson, U., Lu, X. Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art. Materials and Structures, 1995, 28.3: 139-159.
- Kalabińska M., Piłat J. Reologia asfaltów i mas mineralno-asfaltowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
- Kołodziej K., Bichajło L., Siwowski T. Influence of composition and properties of mastic with natural asphalt on mastic asphalt mixture resistance to permanent deformation, Roads and Bridges-Drogi i Mosty 2021, 20, s.57-73.
- Konieczka P., Namieśnik J., Zygmunt B., Bulska E., Świtaj-Zawadka A., Naganowska-Nowak A., Kremer E., Rompa M. Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych, WNT, Warszawa 2007.
- Król J. Nowe metody analizy mikrostruktury asfaltów modyfikowanych polimerami, Drogi i Mosty, 2008, 4, s. 23-46.
- Król J., Radziszewski P., Kowalski K. Influence of microstructural behavior on multiple stress creep recovery (MSCR) in modified bitumen. Procedia Engineering 2015, 111, s. 478-484.
- Król J., Radziszewski P., Kowalski K., Sarnowski M. Assessment of an appropriate modifier content in modified bitumen based on the multiple stress creep recovery test, 3rd International Conference on Road and Rail Infrastructure, 2017.

- Król J., Radziszewski P., Kowalski K., Świeżewski P. Właściwości niskotemperaturowe lepiszczy asfaltowych z dodatkiem parafin nowej generacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2012, (59, nr 3/IV), 265-272.
- Li C., Chen z., Wu B., Li B., Xie J., Xia Y. Effects of steel slag fillers on the rheological properties of asphalt mastic. Construction and Building Materials. T. 2017, 145, s. 383-391.
- Liu Y., You Z. Determining Burger's Model Parameters of Asphalt Materials Using Creep-Recovery Testing Data, Pavements and materials: Modeling, testing, and performance. 2009. s.26-36.
- Lu X., Isacson U., Ekblad J. Phase separation of SBS polimer modified bitumens. Journal of Materials in Civil Engineering 1999, 11(1),s.51–57.
- Mandal T., Sylla R., Bahia H.U., Barmand S. Effect of cross-linking agents on the rheological properties of polymer-modified bitumen. Road Materials and Pavement Design, 2015, 16:sup1, s. 349-361.
- Mazurek G. Liniowa i nieliniowa lepkosprężysta charakterystyka mastyksu asfaltowego w zakresie wysokich temperatur eksploatacyjnych nawierzchni. Monografie, Studia, Rozprawy nr M118, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2019A.
- Mazurek G., Pszczoła M., Szydłowski C. Non-linear mastic characteristics based on the modified MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) test, Structure and Environment 2019B, 11, s. 23-34.
- Mieczkowski P. Możliwość zastosowania imidazoliny jako modyfikatora lepiszczy asfaltowych, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, t. XXXIII, 2016. z. 63 (1/II16), s. 267-274.
- Mielczarek M., Dziadosz S., Słowik M., Bilski M. The assessment of the influence of styrene-butadiene-styrene copolymer on the selected rheological properties characterising durability of modified bitumens used in road pavements, Bull. Pol. Ac.:Tech. Vol. 68, No.6, 2020A, 1471-1479.
- Mielczarek M., Słowik M., Andrzejczak K. The assessment of influence of styrene-butadiene-styrene elastomer's content on the functional properties of asphalt binders. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2020B ; 22 (1): 148–153, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.1.17>.
- Piłat J. Wpływ właściwości mączek mineralnych na kształtowanie cech technicznych kompozytów mineralno-asfaltowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- Piłat J., Król J., Błażejowski K., Kowalski K., Sarnowski M. Badanie sztywności pełzania asfaltów w reometrze zginanej belki (BBR), Drogownictwo, 2010, nr 3, str.75-80.
- PN-EN 1097-4 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 4: Oznaczanie pustych przestrzeni suchego, zagęszczonego wypełniacza.
- PN-EN 1097-7:2008. Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 7. Oznaczanie gęstości wypełniacza. Metoda piknometryczna.

- PN-EN 12591:2010. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Wymagania dla asfaltów drogowych.
- PN-EN 13043: 2004. Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu.
- PN-EN 13179-1:2013. Badania kruszyw wypełniających stosowanych do mieszanek bitumicznych - część 1. Badanie metodą pierścienia delta i kuli.
- PN-EN 1426: 2015-08. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie penetracji igłą.
- PN-EN 1427:2015-08. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie temperatury mięknięcia. Metoda Pierścień i Kula.
- PN-EN 14770:2012. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczenie zespolonego modułu ścinania i kąta przesunięcia fazowego. Reometr dynamicznego ścinania DSR.
- PN-EN 14771:2012. Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie sztywności pełzania przy zginaniu. Reometr zginanej belki (BBR).
- PN-EN 196-6:2010. Metody badania cementu. Część 6. - Oznaczanie stopnia zmielenia.
- PN-EN 933-10:2002. Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek - Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza).
- PN-EN 933-9 Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Ocena zawartości drobnych cząstek - Badania błękitem metylenowym.
- Raciborski R. „Analiza wpływu mączek mineralnych na właściwości mas bitumicznych”, Prace IBDiM, nr 2-3, 1977.
- Radziszewski P. Wpływ modyfikacji elastomerem SBS na właściwości reologiczne lepiszczy asfaltowych, Polimery, 53, 2008, nr 7-8, 559-563.
- Radziszewski P., Sarnowski M., Król J., Kowalski K., Ruttmar I., Zborowski A. Właściwości asfaltów modyfikowanych gumą i mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2017.
- Radziszewski P., Ziółkowski R. Wpływ modyfikacji lepiszczy asfaltowych na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie oceny mrozoodporności, 3rd International Conference „Modern Technologies in Highway Engineering” Poznań 2005.
- Read J., Whiteoak D. The Shell Bitumen Handbook, Shell UK Oil Products Ltd. 2003.
- Richardson C. The Modern Asphalt Pavement, John Wiley and Sonsm New York, 1914.
- Rigden P.J. The Use of Filler in Bituminous Road Surfacing, Journal of the Society of Chemical Industry, 1947.vol. 66.
- Ryka W., Maliszewska A. Słownik petrograficzny. Wydawnictwa geologiczne. Warszawa 1991.

- Sarnowski M. Rheological properties of road bitumen binders modified with SBS polymers and polyphosphoric acid, *Roads and Bridges - Drogi i mosty*, 2015, 14, 47-65.
- Shenoy A. A dynamic oscillatory test that fulfills the objective of the elastic recovery test for asphalt binders, *Materials and Structures*, 2008, 41, 1039-1049.
- Słowik M. Analiza niepewności pomiarowych przy ocenie właściwości asfaltów drogowych. *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej. Politechnika Poznańska*. 2010, nr 7, s. 129-144.
- Słowik M. Wybrane zagadnienia lepkości drogowych asfaltów modyfikowanych zawierających elastomer SBS, *Rozprawy nr 508, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań* 2013.
- Słowik M., Adamczak P. Ocena wpływu starzenia krótkookresowego na właściwości asfaltów drogowych modyfikowanych elastomerem SBS, *Drogi i Mosty*, 2007, 1, 41-58.
- Słowik M., Grabowski W., Bilski M. Road bitumen modified with natural asphalt Trinidad Epuré and Gilsonite addition, 2012, *Materiały konferencyjne: 5th Euroasphalt and Eurobitume Congress, Sztambuł, Turcja*.
- Słowik M., Mielczarek M., Bilski M., Wiśniewski D. Ocena wpływu zawartości elastomeru SBS na wartości parametrów charakteryzujących odporność na odkształcenia trwałe asfaltów modyfikowanych, *JCEEA*, 2016, tom XXXIII, zeszyt 63 (1/II/2016), 307-314.
- Song L., Fujian N., Qian D., Zili Z., Xiang M. Effect of filler in asphalt mastic on rheological behavior and susceptibility to rutting. *International Journal of pavement engineering*. 2021. Vol. 22, No. 1, s. 87-96.
- Stefańczyk B., Mieczkowski P. *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2009.
- Sun D., Lu W. Investigation and Improvement of Storage Stability of SBS Modified Asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 2003, v 21:5-6, s. 901-910, DOI:10.1081/LFT-120017456.
- Sun D., Weiman L. Investigation and Improvement of Storage Stability of SBS Modified Asphalt, *Petroleum Science and Technology*, 2003, 21:5-6, 901-910, DOI: 10.1081/LFT-120017456.
- Sybilski D. New simplified equation for the computation of absolute viscosity of polymer-bitumens. *Materials and Structures*. 1997, 30, s.182-187.
- Sybilski D. Non-Newtonian viscosity of polymers-modified bitumens. *Materials and Structures*. 1993, 26, s.15-23.
- Sybilski D. Polimeroasfalty drogowe. Jakość funkcjonalna. *Metodyka i kryteria oceny, Studia i materiały*, 1996, zeszyt nr 45, Warszawa, IBDiM.
- Sybilski D. Relationship between absolute viscosity of polymer-modified bitumens and rutting resistance of pavement. *Materials and Structures*, 1994, 27, s.110-120.
- Sybilski D., Bańkowski W., Horodecka R., Gajewski M., Czajkowski P., Kędzińska A. *Laboratoryjna ocena przydatności polimeroasfaltu z dodatkiem*

- gumy do zastosowania w mieszance AC WMS-część 1-Badania asfaltów, Drogownictwo 2014, 7-8.
- Sybilski D., Horodecka R. Porównanie właściwości mieszanek mineralno-bitumicznych z asfaltami i elastomeroasfaltami, Prace IBDiM, 1997, 3-4, 125-148.
 - Szydłowski H. Teoria pomiarów, PWN, 1974
 - Trzaska E. Asfalty drogowe – produkcja, klasyfikacja oraz właściwości, Nafta-Gaz, 2014, nr 5, s. 325-33.
 - Underwood B.S., Kim Y. R. Nonlinear viscoelastic analysis of asphalt cement and mastics, International Journal of Pavement Engineering, 2015, t.16, nr 6, s.510-529.
 - Wilanowicz J., Grabowski W., Andrzejczak M. Właściwości strukturalne i funkcjonalne popiołów lotnych jako wypełniaczy do mieszanek mineralno-asfaltowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, , 2012 , (59, nr 3/IV), s. 369-376.
 - Wilanowicz J., Grabowski W., Andrzejczak M., Chromiec A. Assessment of the suitability of baghouse dusts from a dust extractor as fillers for hot-mix asphalt. 2013, 57, s. 1269-1277.
 - Wilson A., Fuchs G., Scramoncin C., Martin D., Planche J.P. Localization of the Polymer Phase in Bitumen/Polymer Blends by Field Emission Cryo-Scanning Electron Microscopy, Energy&Fuels, 2000, 14, s. 575-584.
 - WT-1, Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utwaleń na drogach krajowych. GDDKiA, Warszawa 2014.
 - WT-2, Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe. GDDKiA, Warszawa 2014.
 - Zieliński K. Rola kopolimeru SBS w kształtowaniu struktury i właściwości termomechanicznych asfaltów stosowanych w materiałach hydroizolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.
 - Zofka A., Yut I. Correlation between rheology and chemical composition of aged polimer-modified asphalts, Construction and Building Materials, 2014 s.109-117.

ZAŁĄCZNIKI

ZAŁĄCZNIK A. TEST MSCR

A.1. PARAMETRY TESTU MSCR DLA BADANYCH ASFALTÓW I MASTYKSÓW W ZAKRESIE TEMPERATURY OD 40°C DO 82°C

A.2. PARAMETRY TESTU MSCR DLA BADANYCH ASFALTÓW I MASTYKSÓW PO STARZENIU METODĄ RTFOT W ZAKRESIE TEMPERATURY OD 40°C DO 82°C

ZAŁĄCZNIK B. MODELOWANIE RELAKSACJI

B.1. WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELI 4 I 6 PARAMETROWYCH DLA ASFALTU 50/70 I MASTYKSÓW SPORZĄDZONYCH Z JEGO UDZIAŁEM, NA PODSTAWIE BADANIA RELAKSACJI W WARUNKACH STAŁEGO ODKSZTAŁCENIA W TEMPERATURZE -12°C W DUKTYLOMETRZE

B.2. WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELI 4 I 6 PARAMETROWYCH DLA ASFALTU 3%SBS I MASTYKSÓW SPORZĄDZONYCH Z JEGO UDZIAŁEM, NA PODSTAWIE BADANIA RELAKSACJI W WARUNKACH STAŁEGO ODKSZTAŁCENIA W TEMPERATURZE -12°C W DUKTYLOMETRZE

B.3. WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELI 4 I 6 PARAMETROWYCH DLA ASFALTU 5%SBS I MASTYKSÓW SPORZĄDZONYCH Z JEGO UDZIAŁEM, NA PODSTAWIE BADANIA RELAKSACJI W WARUNKACH STAŁEGO ODKSZTAŁCENIA W TEMPERATURZE -12°C W DUKTYLOMETRZE

B.4. WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELI 4 I 6 PARAMETROWYCH DLA ASFALTU 7%SBS I MASTYKSÓW SPORZĄDZONYCH Z JEGO UDZIAŁEM, NA PODSTAWIE BADANIA RELAKSACJI W WARUNKACH STAŁEGO ODKSZTAŁCENIA W TEMPERATURZE -12°C W DUKTYLOMETRZE

B.5. WARTOŚCI PARAMETRÓW MODELI 4 I 6 PARAMETROWYCH DLA ASFALTU 9%SBS I MASTYKSÓW SPORZĄDZONYCH Z JEGO UDZIAŁEM, NA PODSTAWIE BADANIA RELAKSACJI W WARUNKACH STAŁEGO ODKSZTAŁCENIA W TEMPERATURZE -12°C W DUKTYLOMETRZE

Załącznik A.1.

Parametry testu MSCR dla badanych asfaltów i mastyksów w zakresie temperatury od 40°C do 82°C.

50/70		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R_{0,1kPa}	%	-1,74E+01	-5,93E+00	-4,41E+00	-1,15E+00	3,79E+00	4,81E+00	1,09E+01	3,70E+01
R_{3,2kPa}		-1,93E+01	-7,04E+00	-4,80E+00	-2,15E+00	1,52E-01	1,59E+00	7,17E+00	2,72E+01
R_{10kPa}		-3,61E+01	-1,11E+01	-6,60E+00	-2,91E+00	-6,29E-01	2,48E-01	2,03E+00	2,25E+01
R_{diff 0,1-3,2}		-1,07E+01	-1,42E+01	-8,89E+00	-9,48E+01	1,20E+02	6,70E+01	3,42E+01	2,64E+01
R_{diff 0,1-10,0}		-1,06E+02	-6,55E+01	-4,96E+01	-1,64E+02	1,53E+02	9,50E+01	7,58E+01	3,91E+01
R_{diff 3,2-10,0}		-8,65E+01	-4,32E+01	-3,71E+01	-3,55E+01	-1,01E+02	8,55E+01	4,77E+01	1,72E+01
J_{nr (0,1)}	1/kPa	6,08E-02	2,40E-02	1,72E-02	8,30E-03	2,90E-03	1,53E-03	5,75E-04	1,00E-04
J_{nr (3,2)}		6,51E-02	2,58E-02	1,83E-02	8,85E-03	3,10E-03	1,68E-03	5,75E-04	1,00E-04
J_{nr (10,0)}		8,81E-02	3,17E-02	2,11E-02	9,80E-03	3,33E-03	1,78E-03	6,50E-04	1,00E-04
J_{nr diff 3,2-0,1}	%	7,12E+00	3,80E+00	6,33E+00	6,95E+00	7,41E+00	6,17E+00	5,20E+00	1,87E+01
J_{nr diff 10-0,1}		4,47E+01	2,41E+01	2,26E+01	1,89E+01	1,72E+01	1,42E+01	7,64E+00	2,62E+01
J_{nr diff 10-3,2}		3,51E+01	6,25E+00	1,53E+01	1,11E+01	9,08E+00	7,58E+00	6,90E+00	6,32E+00
50/70+WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R_{0,1kPa}	%	3,03E+00	1,92E+00	4,65E+00	6,54E+00	1,19E+01	1,81E+01	2,22E+01	3,92E+01
R_{3,2kPa}		-9,74E-01	-4,11E-01	-7,43E-03	7,33E-01	2,67E+00	4,74E+00	7,01E+00	2,44E+01
R_{10kPa}		-1,79E+00	-7,14E-01	-3,95E-01	4,25E-02	9,11E-01	2,13E+00	5,33E+00	1,83E+01
R_{diff 0,1-3,2}		1,30E+02	8,68E+01	1,00E+02	8,88E+01	7,76E+01	6,63E+01	5,90E+01	3,77E+01
R_{diff 0,1-10,0}		1,54E+02	9,55E+01	1,09E+02	9,92E+01	9,24E+01	8,48E+01	7,79E+01	5,31E+01
R_{diff 3,2-10,0}		-8,39E+01	-5,53E+01	1,10E+02	9,31E+01	6,57E+01	5,49E+01	4,80E+01	2,48E+01
J_{nr (0,1)}	1/kPa	4,10E-03	1,80E-03	1,18E-03	5,75E-04	2,25E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr (3,2)}		4,50E-03	2,03E-03	1,30E-03	6,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr (10,0)}		6,13E-03	2,45E-03	1,60E-03	7,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr diff 3,2-0,1}	%	1,01E+01	9,10E+00	1,45E+01	1,47E+01	5,75E+00	1,12E+00	5,77E+00	4,48E+00
J_{nr diff 10-0,1}		4,97E+01	2,63E+01	3,27E+01	3,15E+01	2,13E+01	1,35E+01	8,77E+00	3,25E+00
J_{nr diff 10-3,2}		3,58E+01	1,53E+01	1,60E+01	1,46E+01	1,47E+01	1,38E+01	1,32E+01	1,84E+00
50/70+WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R_{0,1kPa}	%	5,55E+00	2,35E+00	5,34E+00	7,65E+00	1,27E+01	2,15E+01	2,78E+01	3,70E+01
R_{3,2kPa}		-5,08E-01	-1,78E-01	3,01E-01	1,04E+00	1,20E+00	5,94E+00	1,25E+01	2,72E+01
R_{10kPa}		-1,75E+00	-6,66E-01	-3,32E-01	1,32E-01	9,24E-01	7,05E-01	7,75E+00	2,25E+01
R_{diff 0,1-3,2}		1,10E+02	7,89E+01	9,47E+01	8,65E+01	8,09E+01	7,23E+01	5,50E+01	2,64E+01
R_{diff 0,1-10,0}		1,33E+02	8,95E+01	1,07E+02	9,78E+01	9,27E+01	8,66E+01	7,21E+01	3,91E+01
R_{diff 3,2-10,0}		-2,50E+02	-2,28E+02	2,99E+02	8,36E+01	6,18E+01	5,15E+01	3,79E+01	1,72E+01
J_{nr (0,1)}	1/kPa	2,97E-03	1,45E-03	1,03E-03	5,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
J_{nr (3,2)}		3,70E-03	1,75E-03	1,25E-03	6,00E-04	2,50E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04
J_{nr (10,0)}		5,93E-03	2,40E-03	1,58E-03	7,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	7,50E-05	1,00E-04
J_{nr diff 3,2-0,1}	%	2,48E+01	1,69E+01	2,64E+01	2,16E+01	1,50E+01	5,48E+00	1,37E+01	1,87E+01
J_{nr diff 10-0,1}		1,01E+02	5,03E+01	5,81E+01	4,41E+01	3,31E+01	2,05E+01	6,43E+00	2,62E+01
J_{nr diff 10-3,2}		6,10E+01	2,73E+01	2,51E+01	1,85E+01	1,57E+01	1,51E+01	1,28E+01	6,32E+00

50/70+WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,96E-01	1,65E+00	3,19E+00	5,43E+00	6,71E+00	1,19E+01	2,49E+01	2,66E+01
R _{3,2kPa}		-1,47E+00	-6,24E-01	-2,40E-01	4,96E-01	1,85E+00	3,17E+00	1,16E+01	1,61E+01
R _{10kPa}		-2,45E+00	-8,93E-01	-5,72E-01	-7,69E-02	6,45E-01	2,93E-01	6,99E-02	8,28E+00
R _{diff 0,1-3,2}		1,92E+02	1,04E+02	1,08E+02	9,08E+01	6,86E+01	7,50E+01	5,31E+01	4,08E+01
R _{diff 0,1-10,0}		2,55E+02	1,16E+02	1,18E+02	1,01E+02	8,90E+01	8,94E+01	7,17E+01	5,78E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-6,70E+01	-3,26E+01	-1,45E+02	1,16E+02	6,52E+01	5,94E+01	3,98E+01	2,97E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	5,23E-03	2,23E-03	1,50E-03	7,00E-04	4,50E-04	2,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		6,30E-03	2,73E-03	1,93E-03	8,50E-04	3,50E-04	2,75E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		8,23E-03	3,23E-03	2,15E-03	9,50E-04	4,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	2,00E+01	1,81E+01	2,44E+01	2,22E+01	2,87E+01	1,37E+01	2,36E+00	1,90E+00
J _{nr diff 10-0,1}		5,73E+01	2,39E+01	4,16E+01	3,78E+01	3,25E+01	2,20E+01	8,75E+00	4,87E+00
J _{nr diff 10-3,2}		3,11E+01	1,34E+01	1,38E+01	1,28E+01	1,10E+01	1,16E+01	1,14E+01	6,51E+00
3%SBS		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	6,60E+01	1,75E+01	1,59E+01	1,51E+01	1,19E+01	1,45E+01	2,29E+01	3,18E+01
R _{3,2kPa}		-1,05E+01	-4,92E+00	-2,98E+00	-5,05E-01	1,08E+00	4,49E+00	1,64E+01	2,52E+01
R _{10kPa}		-2,38E+01	-8,27E+00	-4,80E+00	-1,82E+00	-1,38E-01	2,10E+00	5,06E+00	1,87E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,16E+02	1,22E+02	1,26E+02	1,04E+02	8,90E+01	6,10E+01	2,88E+01	2,08E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,36E+02	1,49E+02	1,40E+02	1,13E+02	1,01E+02	8,55E+01	6,29E+01	4,13E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-1,28E+02	-5,26E+01	-6,26E+01	-3,42E+02	1,16E+02	6,28E+01	4,80E+01	2,58E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	4,10E-03	1,13E-02	9,20E-03	4,80E-03	2,68E-03	1,13E-03	3,75E-04	1,00E-04
J _{nr (3,2)}		4,02E-02	2,32E-02	1,35E-02	6,53E-03	3,25E-03	1,33E-03	4,50E-04	2,00E-04
J _{nr (10,0)}		6,18E-02	2,49E-02	1,65E-02	7,65E-03	3,73E-03	1,53E-03	5,25E-04	2,00E-04
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	5,91E+02	7,01E+01	5,02E+01	3,64E+01	2,25E+01	1,60E+01	7,94E+00	1,42E+01
J _{nr diff 10-0,1}		9,71E+02	1,15E+02	8,31E+01	6,05E+01	3,91E+01	3,21E+01	2,94E+01	2,73E+01
J _{nr diff 10-3,2}		5,41E+01	2,20E+01	9,97E+00	1,76E+01	1,35E+01	1,39E+01	1,64E+01	1,15E+01
3%SBS+WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	6,70E+01	3,14E-01	5,10E+01	3,92E+01	3,93E+01	3,50E+01	2,97E+01	5,06E+01
R _{3,2kPa}		9,15E-01	4,80E-01	1,64E+00	1,19E+00	1,09E+01	1,90E+01	2,88E+01	3,97E+01
R _{10kPa}		-1,07E+00	-5,21E-01	4,77E-01	1,52E+00	3,86E+00	9,48E+00	1,88E+01	3,43E+01
R _{diff 0,1-3,2}		9,79E+01	7,39E+01	9,34E+01	8,69E+01	7,23E+01	4,58E+01	2,55E+01	2,15E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,02E+02	7,62E+01	9,91E+01	9,60E+01	9,01E+01	7,29E+01	5,13E+01	3,23E+01
R _{diff 3,2-10,0}		4,31E+01	1,56E+02	8,57E+01	7,00E+01	6,44E+01	5,00E+01	3,47E+01	1,37E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,13E-03	1,20E-03	7,25E-04	5,25E-04	2,75E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		4,87E-03	2,70E-03	1,63E-03	8,50E-04	3,75E-04	1,00E-04	7,50E-05	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		6,67E-03	3,30E-03	2,00E-03	1,05E-03	4,50E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,32E+02	9,24E+01	1,33E+02	6,22E+01	3,95E+01	1,01E+01	2,42E+00	7,98E+00
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,29E+02	1,88E+02	9,37E+01	6,89E+01	3,36E+01	1,91E+01	1,62E+01
J _{nr diff 10-3,2}		4,05E+01	1,65E+01	1,72E+01	1,93E+01	2,10E+01	2,14E+01	1,92E+01	7,56E+00

3%SBS+WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,84E+01	4,94E+01	4,74E+01	5,72E+01	5,22E+01	4,81E+01	2,59E+01	5,45E+01
R _{3,2kPa}		4,55E+00	2,24E+00	3,25E+00	7,48E+00	1,15E+01	9,92E+00	2,88E+01	3,84E+01
R _{10kPa}		-4,37E-03	-4,73E-02	6,81E-01	2,08E+00	4,20E+00	9,45E+00	1,87E+01	3,15E+01
R _{diff 0,1-3,2}		9,21E+01	7,16E+01	9,27E+01	8,69E+01	3,90E+01	5,94E+01	4,20E+01	2,95E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,00E+02	7,51E+01	4,99E+01	9,64E+01	9,20E+01	8,03E+01	6,24E+01	4,21E+01
R _{diff 3,2-10,0}		1,01E+02	7,69E+01	8,50E+01	7,23E+01	6,34E+01	5,17E+01	3,52E+01	1,79E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	2,33E-04	4,00E-04	4,50E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,67E-03	1,25E-03	1,03E-03	5,25E-04	2,75E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		3,73E-03	2,13E-03	1,58E-03	6,50E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	5,51E+02	1,66E+02	1,38E+02	7,20E+01	3,01E+01	1,79E+00	8,42E+00	6,31E+00
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	3,34E+02	2,57E+02	1,29E+02	6,41E+01	2,25E+01	6,31E+00	1,66E-01
J _{nr diff 10-3,2}		1,29E+02	5,23E+01	4,96E+01	3,29E+01	2,61E+01	2,20E+01	1,60E+01	1,16E+00
3%SBS+WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	6,89E+01	4,52E+01	3,28E+01	3,90E+01	3,72E+01	3,51E+01	4,01E+01	5,28E+01
R _{3,2kPa}		3,91E+00	2,06E+00	3,20E+00	5,50E+00	1,03E+01	1,71E+01	2,73E+01	3,85E+01
R _{10kPa}		-5,83E-01	-4,46E-01	5,28E-01	1,68E+00	3,94E+00	4,66E+00	1,89E+01	3,30E+01
R _{diff 0,1-3,2}		9,43E+01	7,16E+01	9,26E+01	8,59E+01	7,25E+01	5,13E+01	3,17E+01	2,65E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,01E+02	7,57E+01	9,88E+01	9,57E+01	8,94E+01	7,47E+01	5,27E+01	3,69E+01
R _{diff 3,2-10,0}		1,15E+02	9,07E+01	8,36E+01	6,93E+01	6,15E+01	4,80E+01	3,08E+01	1,42E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	8,67E-04	8,00E-04	8,25E-04	5,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		3,70E-03	2,68E-03	1,55E-03	7,75E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		5,67E-03	3,85E-03	1,88E-03	9,00E-04	4,00E-04	1,75E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	3,24E+02	1,78E+02	8,78E+01	5,45E+01	2,69E+01	5,61E+00	2,42E+00	1,32E+01
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	2,90E+02	1,31E+02	8,53E+01	3,89E+01	2,85E+01	1,59E+01	2,16E+01
J _{nr diff 10-3,2}		5,34E+01	3,14E+01	2,31E+01	2,00E+01	1,97E+01	1,93E+01	1,59E+01	7,25E+00
5%SBS		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	9,04E+01	6,75E+01	7,47E+01	7,46E+01	5,10E+01	4,20E+01	4,23E+01	4,71E+01
R _{3,2kPa}		-1,73E+00	-1,15E+00	1,59E+00	-2,65E-04	8,72E+00	1,88E+01	3,21E+01	4,46E+01
R _{10kPa}		-1,20E+01	-7,55E+00	-2,61E+00	-2,31E+00	4,70E-01	6,01E+00	1,73E+01	3,50E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,02E+02	7,63E+01	9,83E+01	9,88E+01	8,29E+01	5,53E+01	2,41E+01	5,28E+00
R _{diff 0,1-10,0}		1,13E+02	8,34E+01	1,04E+02	1,03E+02	9,62E+01	8,55E+01	5,90E+01	2,57E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-5,92E+02	-4,06E+02	-6,84E+01	1,00E+02	7,76E+01	6,78E+01	4,59E+01	2,15E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	5,00E-04	4,25E-04	1,35E-03	1,20E-03	9,00E-04	5,00E-04	2,00E-04	1,00E-04
J _{nr (3,2)}		2,14E-02	1,41E-02	7,93E-03	7,58E-03	1,95E-03	7,75E-04	3,00E-04	1,00E-04
J _{nr (10,0)}		3,72E-02	2,38E-02	1,11E-02	1,03E-02	2,53E-03	1,03E-03	3,50E-04	1,00E-04
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	4,55E+03	2,76E+03	6,54E+02	5,21E+02	1,20E+02	5,03E+01	2,10E+01	5,33E+00
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	4,76E+03	9,96E+02	7,41E+02	1,90E+02	1,01E+02	6,01E+01	2,76E+01
J _{nr diff 10-3,2}		7,43E+01	5,07E+01	4,03E+01	3,51E+01	3,11E+01	3,39E+01	3,24E+01	2,12E+01

5%SBS+WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,83E+01	7,07E+01	9,55E+01	9,60E+01	9,63E+01	1,01E+02	9,62E+01	1,09E+02
R _{3,2kPa}		2,50E+01	3,07E+01	4,82E+01	6,16E+01	6,90E+01	8,01E+01	7,63E+01	7,94E+01
R _{10kPa}		4,29E+00	6,53E-02	1,40E+01	2,29E+01	3,42E+01	5,34E+01	4,81E+01	7,07E+01
R _{diff 0,1-3,2}		7,13E+01	4,24E+01	4,95E+01	3,59E+01	2,85E+01	2,04E+01	2,07E+01	2,58E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,51E+01	6,81E+01	8,53E+01	7,62E+01	6,47E+01	4,72E+01	5,00E+01	3,43E+01
R _{diff 3,2-10,0}		8,18E+01	5,87E+01	7,12E+01	6,39E+01	5,14E+01	3,37E+01	3,70E+01	1,10E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		8,00E-04	2,75E-04	2,25E-04	1,50E-04	5,00E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,90E-03	7,50E-04	5,75E-04	3,50E-04	1,50E-04	0,00E+00	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	9,98E+02	9,62E+02	1,37E+03	1,16E+03	1,10E+03	1,02E+03	6,82E+02	8,80E+04
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	2,69E+03	3,42E+03	3,21E+03	2,68E+03	2,41E+03	1,56E+03	1,33E+05
J _{nr diff 10-3,2}		1,67E+02	1,29E+02	1,39E+02	1,67E+02	1,31E+02	1,22E+02	1,13E+02	2,71E+01
5%SBS+WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,54E+01	6,85E+01	7,71E+01	9,60E+01	1,01E+02	9,61E+01	8,72E+01	1,27E+02
R _{3,2kPa}		3,33E+01	2,02E+01	6,44E+01	6,46E+01	8,36E+01	7,34E+01	6,62E+01	8,18E+01
R _{10kPa}		3,86E+00	3,20E+00	3,12E+01	2,85E+01	5,34E+01	4,79E+01	4,71E+01	7,71E+01
R _{diff 0,1-3,2}		5,58E+01	5,29E+01	1,64E+01	2,64E+01	1,71E+01	2,43E+01	2,41E+01	2,68E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,49E+01	7,15E+01	5,96E+01	7,06E+01	4,70E+01	5,10E+01	4,60E+01	3,94E+01
R _{diff 3,2-10,0}		8,84E+01	6,31E+01	5,16E+01	5,87E+01	3,60E+01	3,64E+01	2,89E+01	6,35E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	7,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		4,00E-04	3,75E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,83E-03	1,05E-03	3,00E-04	2,25E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	2,70E+02	6,56E+02	5,39E+01	1,56E+03	1,10E+03	1,11E+04	1,17E+02	4,06E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,84E+03	2,49E+02	4,64E+03	2,94E+03	5,71E+04	1,78E+02	4,01E+02
J _{nr diff 10-3,2}		3,58E+02	1,22E+02	1,27E+02	1,72E+02	1,60E+02	9,20E+01	2,81E+01	9,94E+00
5%SBS+WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,94E+01	6,37E+01	8,10E+01	8,78E+01	7,85E+01	7,58E+01	8,79E+01	7,54E+01
R _{3,2kPa}		1,55E+01	9,48E+00	1,36E+01	2,19E+01	3,53E+01	4,49E+01	5,49E+01	5,54E+01
R _{10kPa}		1,58E-01	2,10E+00	4,01E+00	4,64E+00	1,36E+01	2,37E+01	3,97E+01	4,19E+01
R _{diff 0,1-3,2}		8,11E+01	6,40E+01	8,34E+01	7,50E+01	5,52E+01	4,08E+01	3,69E+01	2,57E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,71E+01	7,25E+01	9,51E+01	9,47E+01	8,27E+01	6,87E+01	5,44E+01	4,47E+01
R _{diff 3,2-10,0}		8,60E+01	5,79E+01	1,94E+01	7,92E+01	6,10E+01	4,72E+01	2,77E+01	2,48E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	3,00E-04	1,25E-04	1,75E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,50E-03	8,50E-04	7,50E-04	7,00E-04	1,50E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,87E-03	1,40E-03	1,08E-03	1,13E-03	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	4,04E+02	5,05E+02	3,54E+02	5,32E+02	1,45E+02	8,92E+01	2,97E+02	1,72E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	9,31E+02	5,80E+02	1,01E+03	2,70E+02	1,71E+02	4,03E+02	2,00E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,18E+02	5,19E+01	4,69E+01	7,49E+01	5,07E+01	4,30E+01	2,96E+01	2,06E+01

7%SBS		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	5,58E+01	6,16E+01	9,62E+01	9,58E+01	9,61E+01	9,34E+01	8,85E+01	2,25E+01
R _{3,2kPa}		5,17E+01	4,90E+01	6,53E+01	7,41E+01	9,67E+01	4,49E+01	4,37E+01	8,05E+01
R _{10kPa}		3,83E+00	5,54E-01	2,28E+00	2,96E+00	4,21E+01	4,18E+01	6,15E+01	7,43E+01
R _{diff 0,1-3,2}		7,28E+00	1,40E+01	2,83E+01	2,31E+01	-5,94E-01	2,44E+00	1,10E+00	6,25E+00
R _{diff 0,1-10,0}		9,31E+01	7,37E+01	9,76E+01	9,54E+01	5,62E+01	5,52E+01	3,03E+01	1,35E+01
R _{diff 3,2-10,0}		9,26E+01	4,81E+01	9,75E+01	9,42E+01	5,64E+01	5,41E+01	2,97E+01	5,55E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	5,00E-04	1,75E-04	1,00E-03	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		7,00E-04	5,75E-04	1,08E-03	5,25E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		9,50E-03	7,65E-03	6,38E-03	4,13E-03	6,00E-04	4,00E-04	1,50E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	3,29E+01	4,42E+02	1,17E+03	4,79E+02	2,60E+01	3,91E+01	2,24E+01	3,82E+01
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,15E+03	1,16E+04	7,07E+03	1,92E+03	1,31E+03	3,29E+02	8,54E+01
J _{nr diff 10-3,2}		1,24E+03	1,02E+03	2,65E+03	2,31E+03	2,62E+03	8,70E+02	2,52E+02	3,88E+01
7%SBS+WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,38E+01	7,08E+01	9,80E+01	9,97E+01	1,11E+02	1,08E+02	1,08E+02	1,11E+02
R _{3,2kPa}		6,24E+01	6,11E+01	8,85E+01	8,98E+01	4,86E+01	9,73E+01	9,73E+01	9,59E+01
R _{10kPa}		3,38E+01	3,72E+01	1,74E+01	7,52E+01	9,07E+01	9,46E+01	9,46E+01	9,51E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,54E+01	1,02E+01	9,68E+00	9,92E+00	1,31E+01	1,01E+01	1,01E+01	1,39E+01
R _{diff 0,1-10,0}		5,42E+01	3,56E+01	2,84E+01	2,47E+01	1,83E+01	1,26E+01	1,26E+01	1,45E+01
R _{diff 3,2-10,0}		4,59E+01	1,96E+01	2,07E+01	1,64E+01	5,97E+00	2,80E+00	2,80E+00	7,67E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,67E-04	1,25E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	3,83E+01	2,94E+02	1,61E+03	4,31E+02	1,74E+02	1,68E+02	1,68E+02	1,59E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,21E+03	5,78E+03	1,27E+03	3,08E+02	2,52E+02	2,52E+02	1,77E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,71E+02	1,85E+02	2,02E+02	1,80E+02	1,87E+02	1,24E+02	1,24E+02	3,07E+01
7%SBS+WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,92E+01	6,93E+01	9,56E+01	9,94E+01	1,03E+02	1,10E+02	1,05E+02	1,05E+02
R _{3,2kPa}		5,25E+01	5,13E+01	6,50E+01	6,06E+01	9,12E+01	2,45E+01	9,53E+01	9,52E+01
R _{10kPa}		1,09E+01	1,87E+01	2,24E+01	5,09E+01	4,10E+01	8,97E+01	8,95E+01	9,16E+01
R _{diff 0,1-3,2}		3,36E+01	1,95E+01	3,19E+01	3,94E+01	1,12E+01	1,33E+01	8,96E+00	9,38E+00
R _{diff 0,1-10,0}		8,63E+01	5,47E+01	7,65E+01	4,90E+01	2,62E+01	1,85E+01	1,45E+01	1,28E+01
R _{diff 3,2-10,0}		7,93E+01	4,75E+01	6,88E+01	8,54E+00	1,70E+01	6,07E+00	6,08E+00	3,79E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	7,50E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,20E-03	4,00E-04	1,75E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	2,24E+02	4,69E+02	2,47E+03	5,56E+04	1,26E+03	2,08E+02	3,26E+02	2,90E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	3,57E+03	3,84E+04	2,97E+05	3,33E+03	3,40E+02	5,94E+02	4,53E+02
J _{nr diff 10-3,2}		7,40E+02	4,03E+02	9,53E+02	3,32E+02	1,74E+02	1,23E+02	1,19E+02	7,78E+01

7%SBS+WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	5,43E+01	6,39E+01	9,71E+01	1,00E+02	1,04E+02	1,08E+02	1,13E+02	1,01E+02
R _{3,2kPa}		5,67E+01	4,54E+01	7,73E+01	8,21E+01	8,97E+01	9,33E+01	9,32E+01	9,26E+01
R _{10kPa}		1,47E+01	1,26E+01	3,26E+01	4,30E+01	6,36E+01	7,88E+01	8,03E+01	8,51E+01
R _{diff 0,1-3,2}		3,07E+01	2,15E+01	2,04E+01	1,80E+01	1,36E+01	1,33E+01	1,68E+01	8,41E+00
R _{diff 0,1-10,0}		8,20E+01	6,02E+01	6,65E+01	5,70E+01	3,87E+01	2,67E+01	2,87E+01	1,58E+01
R _{diff 3,2-10,0}		7,41E+01	5,42E+01	5,79E+01	4,76E+01	2,91E+01	1,55E+01	1,39E+01	8,10E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		2,00E-04	1,50E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		8,00E-04	5,50E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,91E+02	2,82E+02	1,46E+03	7,24E+03	1,05E+03	2,98E+02	2,97E+02	1,35E+03
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,26E+03	5,87E+03	2,82E+04	3,66E+03	7,20E+02	7,05E+02	2,58E+03
J _{nr diff 10-3,2}		2,80E+02	2,07E+02	2,82E+02	2,73E+02	2,67E+02	2,14E+02	1,82E+02	9,85E+01
9%SBS		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,66E+01	6,93E+01	9,70E+01	9,75E+01	9,93E+01	1,00E+02	1,00E+02	1,03E+02
R _{3,2kPa}		7,96E+01	6,34E+01	9,00E+01	9,11E+01	9,42E+01	9,78E+01	9,78E+01	9,69E+01
R _{10kPa}		2,15E+01	4,96E+01	7,68E+01	8,88E+01	9,04E+01	9,61E+01	9,61E+01	9,64E+01
R _{diff 0,1-3,2}		6,10E+00	6,41E+00	7,14E+00	6,58E+00	5,16E+00	2,49E+00	2,49E+00	5,63E+00
R _{diff 0,1-10,0}		7,50E+01	2,13E+01	1,87E+01	8,98E-02	4,52E+00	4,17E+00	4,17E+00	6,15E+00
R _{diff 3,2-10,0}		7,29E+01	1,62E+01	1,50E+01	2,57E+00	3,98E+00	1,73E-02	1,73E-02	5,22E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		2,00E-04	7,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,97E-03	4,75E-04	3,25E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	9,68E+01	5,14E+01	2,75E+02	2,43E+02	2,90E+02	2,25E-03	2,25E-03	9,14E+01
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	7,78E+02	6,26E+02	5,28E+02	7,57E+02	1,60E+03	1,52E+03	1,22E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,37E+03	5,09E+02	4,71E+02	8,30E+01	1,79E+02	9,04E+01	9,04E+01	2,37E+01
9%SBS+WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	9,03E+01	7,30E+01	1,02E+02	1,13E+02	1,15E+02	1,09E+02	1,13E+02	1,07E+02
R _{3,2kPa}		6,65E+01	6,06E+01	8,48E+01	9,28E+01	9,57E+01	9,62E+01	9,75E+01	9,67E+01
R _{10kPa}		4,94E+01	4,86E+01	7,30E+01	8,54E+01	9,14E+01	9,31E+01	9,63E+01	9,63E+01
R _{diff 0,1-3,2}		2,64E+01	1,27E+01	1,71E+01	1,81E+01	1,66E+01	1,19E+01	1,34E+01	9,55E+00
R _{diff 0,1-10,0}		4,54E+01	2,50E+01	2,87E+01	2,46E+01	2,04E+01	1,48E+01	3,96E+00	9,92E+00
R _{diff 3,2-10,0}		2,57E+01	1,48E+01	1,41E+01	2,27E+00	4,54E+00	2,65E+00	1,22E+00	4,05E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,00E-04	7,50E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	6,53E+02	2,41E+03	5,62E+02	2,51E+02	1,67E+02	2,02E+02	1,36E+02	1,85E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,10E+03	1,09E+03	4,18E+02	2,47E+02	3,02E+02	1,61E+02	2,05E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,30E+02	8,18E+01	9,88E+01	1,12E+02	1,18E+02	9,57E+01	6,70E+01	2,51E+01

9%SBS+WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R_{0,1kPa}	%	8,02E+01	6,97E+01	9,96E+01	1,01E+02	1,00E+02	9,91E+01	9,89E+01	1,02E+02
R_{3,2kPa}		4,04E+01	4,38E+01	7,14E+01	7,83E+01	8,08E+01	8,78E+01	9,23E+01	9,39E+01
R_{10kPa}		4,05E+01	3,78E+01	6,06E+01	6,79E+01	7,08E+01	8,44E+01	9,06E+01	9,35E+01
R_{diff 0,1-3,2}		5,03E+01	2,81E+01	2,83E+01	2,27E+01	1,92E+01	1,14E+01	6,62E+00	7,28E+00
R_{diff 0,1-10,0}		4,94E+01	3,44E+01	3,91E+01	3,30E+01	2,92E+01	1,49E+01	8,39E+00	8,57E+00
R_{diff 3,2-10,0}		-3,21E+00	9,68E+00	1,52E+01	1,33E+01	1,24E+01	3,93E+00	1,89E+00	4,01E-01
J_{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr (3,2)}		1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J_{nr (10,0)}		1,00E-04	7,50E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr diff 3,2-0,1}	%	3,10E+02	1,22E+03	9,94E+02	7,22E+02	6,28E+02	5,03E+02	2,99E+02	3,94E+02
J_{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	1,84E+03	1,50E+03	1,25E+03	8,52E+02	6,26E+02	4,03E+02	4,26E+02
J_{nr diff 10-3,2}		3,43E+01	4,64E+01	4,66E+01	5,73E+01	6,09E+01	2,03E+01	2,06E+01	9,46E+00
9%SBS+WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R_{0,1kPa}	%	7,64E+01	7,21E+01	1,02E+02	1,09E+02	1,11E+02	1,13E+02	1,15E+02	1,17E+02
R_{3,2kPa}		6,18E+01	5,76E+01	8,71E+01	9,28E+01	9,61E+01	9,76E+01	9,77E+01	9,67E+01
R_{10kPa}		3,09E+01	3,23E+01	6,18E+01	7,56E+01	8,79E+01	9,36E+01	9,55E+01	9,55E+01
R_{diff 0,1-3,2}		1,91E+01	1,51E+01	1,09E+01	1,45E+01	1,32E+01	1,31E+01	1,51E+01	1,75E+01
R_{diff 0,1-10,0}		5,95E+01	4,14E+01	3,93E+01	7,62E+00	2,07E+01	1,67E+01	1,69E+01	1,85E+01
R_{diff 3,2-10,0}		5,00E+01	3,29E+01	2,91E+01	1,85E+01	8,51E+00	4,10E+00	2,19E+00	1,21E+00
J_{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr (3,2)}		1,00E-04	7,50E-05	1,00E-04	1,00E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J_{nr (10,0)}		3,00E-04	1,50E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J_{nr diff 3,2-0,1}	%	4,16E+01	7,50E+02	2,13E+03	3,65E+02	2,11E+02	1,95E+02	1,33E+02	1,36E+02
J_{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	2,68E+03	6,68E+03	1,15E+03	5,04E+02	3,89E+02	1,73E+02	1,54E+02
J_{nr diff 10-3,2}		1,50E+02	2,27E+02	2,56E+02	2,98E+02	2,58E+02	2,07E+02	1,19E+02	5,05E+01

Załącznik A.2.

Parametry testu MSCR dla badanych asfaltów i mastyksów poddanych starzeniu metodą RTFOT w zakresie temperatur od 40°C do 82°C.

50/70 RTFOT		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	-9,60E+00	-4,70E+00	-1,28E+00	1,59E+00	5,50E+00	1,03E+01	2,07E+01	3,70E+01
R _{3,2kPa}		-1,12E+01	-5,49E+00	-2,63E+00	-7,16E-01	1,26E+00	6,52E+00	1,64E+01	2,72E+01
R _{10kPa}		-1,93E+01	-8,53E+00	-3,69E+00	-1,45E+00	6,27E-02	2,21E+00	8,90E+00	2,25E+01
R _{diff 0,1-3,2}		-1,62E+01	-1,27E+01	-1,05E+02	1,46E+02	7,72E+01	3,69E+01	2,09E+01	2,64E+01
R _{diff 0,1-10,0}		-1,01E+02	-5,72E+01	-1,88E+02	1,93E+02	9,89E+01	7,86E+01	5,69E+01	3,91E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-7,32E+01	-3,80E+01	-4,02E+01	-1,03E+02	9,31E+01	6,62E+01	4,56E+01	1,72E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	3,72E-02	1,88E-02	9,90E-03	4,55E-03	1,83E-03	7,00E-04	2,00E-04	1,00E-04
J _{nr (3,2)}		4,05E-02	2,04E-02	1,07E-02	4,95E-03	2,03E-03	7,00E-04	2,00E-04	1,00E-04
J _{nr (10,0)}		5,20E-02	2,51E-02	1,22E-02	5,45E-03	2,23E-03	8,00E-04	3,00E-04	1,00E-04
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	8,98E+00	6,27E+00	8,59E+00	8,93E+00	9,63E+00	5,27E+00	7,05E-02	1,87E+01
J _{nr diff 10-0,1}		4,01E+01	2,39E+01	2,38E+01	2,05E+01	2,02E+01	1,70E+01	1,85E+01	2,62E+01
J _{nr diff 10-3,2}		2,85E+01	1,62E+01	1,40E+01	7,78E+00	9,66E+00	1,11E+01	1,07E+01	6,32E+00
50/70 RTFOT +WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	2,47E+00	2,11E+00	8,60E-01	5,31E+00	1,19E+01	1,98E+01	3,04E+01	4,58E+01
R _{3,2kPa}		-9,42E-01	-2,90E-01	2,72E-01	1,39E+00	3,81E+00	9,70E+00	1,96E+01	3,33E+01
R _{10kPa}		-1,53E+00	-5,70E-01	-2,33E-01	3,59E-01	1,58E+00	5,12E+00	1,36E+01	2,81E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,50E+02	8,62E+01	9,25E+01	8,00E+01	6,79E+01	5,11E+01	3,54E+01	2,74E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,79E+02	9,65E+01	1,06E+02	9,48E+01	8,67E+01	7,42E+01	5,51E+01	3,87E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-6,31E+01	-7,41E+01	1,88E+02	7,41E+01	5,85E+01	4,72E-01	3,05E+01	1,57E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	3,90E-03	1,55E-03	1,00E-03	5,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		4,30E-03	1,80E-03	1,13E-03	5,25E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		5,33E-03	2,05E-03	1,30E-03	6,00E-04	2,25E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,07E+01	1,14E+01	1,40E+01	1,35E+01	8,65E+00	7,25E-03	2,17E+00	1,35E+00
J _{nr diff 10-0,1}		3,72E+01	2,49E+01	2,97E+01	2,81E+01	2,20E+01	1,34E+01	5,95E+00	6,77E+00
J _{nr diff 10-3,2}		2,38E+01	1,18E+01	1,37E+01	1,28E+01	1,23E+01	1,26E+01	1,09E+01	5,34E+00
50/70 RTFOT +WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	6,40E+00	9,88E+00	1,12E+01	1,35E+01	2,43E+01	2,77E+01	4,38E+01	5,05E+01
R _{3,2kPa}		6,25E-01	1,29E+00	1,59E+00	4,25E+00	7,55E+00	1,02E+01	2,49E+01	2,90E+01
R _{10kPa}		-4,35E-01	0,00E+00	3,29E-01	1,69E+00	3,89E+00	6,08E+00	1,88E+01	2,26E+01
R _{diff 0,1-3,2}		9,10E+01	6,52E+01	8,57E+01	7,63E+01	6,88E+01	6,39E+01	4,31E+01	4,33E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,07E+02	7,49E+01	9,68E+01	9,06E+01	8,39E+01	7,86E+01	5,69E+01	5,60E+01
R _{diff 3,2-10,0}		1,33E+02	7,45E+01	7,86E+01	6,00E+01	4,85E+01	4,22E+01	2,44E+01	2,28E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,50E-03	6,00E-04	5,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,37E-03	6,75E-04	5,25E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,03E-03	9,00E-04	6,75E-04	2,75E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	2,54E+01	9,55E+00	1,64E+01	1,63E+00	1,60E+01	1,95E+01	1,42E+01	2,56E+00
J _{nr diff 10-0,1}		3,69E+01	3,83E+01	4,43E+01	1,94E+01	1,42E+00	7,69E+00	1,26E+01	3,85E+00
J _{nr diff 10-3,2}		5,07E+01	2,55E+01	2,41E+01	2,10E+01	1,74E+01	1,46E+01	3,95E+00	4,10E+00

50/70 RTFOT +WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	4,01E+00	3,86E+00	5,93E+00	1,11E+01	1,70E+01	2,52E+01	3,62E+01	4,85E+01
R _{3,2kPa}		-4,21E-01	-4,20E-02	7,67E-02	1,23E+00	4,22E+00	9,47E+00	2,09E+01	3,14E+01
R _{10kPa}		-1,36E+00	-4,22E-01	-4,50E-01	4,87E-01	1,80E+00	5,18E+00	1,46E+01	2,59E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,10E+02	7,58E+01	9,92E+01	4,34E+01	7,52E+01	6,25E+01	4,23E+01	3,52E+01
R _{diff 0,1-10,0}		1,30E+02	8,33E+01	1,08E+02	9,56E+01	8,94E+01	7,95E+01	5,97E+01	4,65E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-2,37E+02	-6,78E+02	-6,39E+02	6,98E+01	5,73E+01	4,53E+01	3,01E+01	1,74E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	2,77E-03	1,03E-03	1,15E-03	3,00E-04	1,75E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		3,07E-03	1,28E-03	1,53E-03	4,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		4,70E-03	1,68E-03	1,93E-03	5,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,35E+01	2,05E+01	3,23E+01	2,30E+01	9,36E+00	2,52E+00	5,41E+00	1,54E+01
J _{nr diff 10-0,1}		7,11E+01	4,73E+01	6,54E+01	4,41E+01	2,65E+01	1,67E+01	6,13E+00	2,11E+01
J _{nr diff 10-3,2}		5,07E+01	2,11E+01	2,51E+01	1,72E+01	1,57E+01	1,38E+01	1,22E+01	4,91E-02
3%SBS RTFOT		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	5,48E+01	4,11E+01	1,15E+01	1,40E+01	1,23E+01	2,31E+01	2,66E+01	4,70E+01
R _{3,2kPa}		-6,37E+00	-4,77E+00	-7,83E-01	1,70E+00	2,44E+00	1,55E+01	2,12E+01	4,42E+01
R _{10kPa}		-1,22E+01	-9,14E+00	-2,00E+00	-4,55E-03	-8,44E-02	4,40E+00	9,88E+00	3,97E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,12E+02	8,37E+01	1,07E+02	8,79E+01	8,14E+01	3,31E+01	2,23E+01	5,81E+00
R _{diff 0,1-10,0}		1,22E+02	9,17E+01	1,18E+02	1,00E+02	9,65E+01	6,54E+01	5,18E+01	1,56E+01
R _{diff 3,2-10,0}		-9,15E+01	-6,86E+01	-1,64E+02	1,02E+02	9,57E+01	4,83E+01	3,95E+01	1,04E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	7,00E-03	5,25E-03	5,73E-03	2,80E-03	2,50E-03	5,00E-04	3,50E-04	7,50E-05
J _{nr (3,2)}		2,65E-02	1,99E-02	7,63E-03	3,65E-03	3,15E-03	6,00E-04	4,00E-04	1,00E-04
J _{nr (10,0)}		3,55E-02	2,66E-02	9,03E-03	4,30E-03	3,68E-03	7,00E-04	4,50E-04	1,00E-04
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	2,80E+02	2,10E+02	3,30E+01	2,85E+01	2,31E+01	1,35E+01	9,47E+00	3,84E+00
J _{nr diff 10-0,1}		4,08E+02	3,06E+02	5,73E+01	5,04E+01	4,31E+01	3,54E+01	2,84E+01	1,57E+01
J _{nr diff 10-3,2}		3,37E+01	2,53E+01	1,84E+01	1,71E+01	1,24E+01	1,92E+01	1,72E+01	9,46E+00
3%SBS RTFOT +WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,80E+01	5,77E+01	6,78E+01	5,86E+01	4,18E+01	4,75E+01	5,22E+01	7,00E+01
R _{3,2kPa}		1,07E+01	4,99E+00	1,02E+01	1,53E+01	1,82E+01	3,24E+01	4,29E+01	5,25E+01
R _{10kPa}		9,55E-01	9,31E-01	2,57E+00	3,81E+00	7,26E+00	1,94E+01	3,42E+01	4,90E+01
R _{diff 0,1-3,2}		8,79E+01	6,85E+01	8,50E+01	7,39E+01	6,58E+01	3,19E+01	1,78E+01	2,43E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,89E+01	7,38E+01	9,62E+01	9,14E+01	8,62E+01	5,91E+01	3,44E+01	2,93E+01
R _{diff 3,2-10,0}		9,08E+01	6,10E+01	7,48E+01	6,71E+01	6,13E+01	4,00E+01	2,02E+01	3,58E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,33E-04	2,25E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,50E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,77E-03	1,05E-03	8,00E-04	3,75E-04	2,75E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		3,00E-03	1,43E-03	1,00E-03	4,75E-04	3,50E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	9,87E+02	2,77E+02	1,72E+02	7,67E+01	4,75E+01	9,13E-01	4,41E+00	5,22E+01
J _{nr diff 10-0,1}		2,77E+03	3,85E+02	2,51E+02	1,27E+02	9,67E+01	2,63E+01	9,68E+00	4,59E+01
J _{nr diff 10-3,2}		4,12E+01	2,31E+01	2,89E+01	2,82E+01	2,79E+01	2,52E+01	1,19E+01	3,77E+00

3%SBS RTFOT +WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	3,14E+01	4,28E+01	6,25E+01	5,55E+01	4,36E+01	4,75E+01	4,51E+01	7,00E+01
R _{3,2kPa}		1,46E+00	2,38E+00	2,39E+00	9,36E+00	1,68E+01	3,07E+01	2,76E+01	5,22E+01
R _{10kPa}		4,87E-01	1,15E+00	2,34E+00	3,39E+00	9,32E+00	2,17E+01	1,87E+01	4,78E+01
R _{diff 0,1-3,2}		9,53E+01	6,72E+01	8,79E+01	8,31E+01	6,15E+01	3,54E+01	3,89E+01	2,53E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,85E+01	7,27E+01	9,62E+01	9,39E+01	7,86E+01	5,44E+01	5,85E+01	3,17E+01
R _{diff 3,2-10,0}		6,68E+01	5,30E+01	6,90E+01	6,37E+01	4,46E+01	2,93E+01	3,22E+01	8,57E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,10E-03	3,50E-04	3,75E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,90E-03	7,25E-04	8,00E-04	5,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,40E-03	9,50E-04	1,05E-03	6,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	7,67E+01	8,84E+01	1,23E+02	6,39E+01	5,83E+00	1,56E+01	1,91E+01	1,92E+01
J _{nr diff 10-0,1}		1,19E+02	1,37E+02	1,96E+02	1,12E+02	1,70E+01	4,94E-01	4,10E+00	1,25E+01
J _{nr diff 10-3,2}		2,40E+01	2,22E+01	3,22E+01	2,96E+01	2,42E+01	1,79E+01	1,85E+01	5,63E+00
3%SBS RTFOT +WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	5,38E+01	4,40E+01	5,21E+01	4,54E+01	4,27E+01	4,64E+01	5,78E+01	7,13E+01
R _{3,2kPa}		6,41E+00	5,81E+00	2,65E+00	1,38E+01	2,00E+01	3,60E+01	4,94E+01	5,15E+01
R _{10kPa}		1,27E+00	1,50E+00	9,05E-01	6,04E+00	1,09E+01	2,46E+01	3,77E+01	3,93E+01
R _{diff 0,1-3,2}		8,81E+01	6,55E+01	8,16E+01	6,95E+01	5,31E+01	3,47E+01	3,10E+01	2,80E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,76E+01	7,25E+01	9,32E+01	8,67E+01	7,44E+01	4,76E+01	3,63E+01	4,48E+01
R _{diff 3,2-10,0}		8,01E+01	5,48E+01	6,29E+01	5,63E+01	2,34E+01	3,70E+01	2,42E+01	2,43E+01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	9,00E-04	3,25E-04	3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,60E-03	7,50E-04	5,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,20E-03	9,75E-04	6,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	7,97E+01	9,57E+01	5,80E+01	2,00E+01	9,74E-01	6,35E+00	8,29E+00	6,23E+00
J _{nr diff 10-0,1}		1,49E+02	1,49E+02	9,93E+01	5,07E+01	2,25E+01	6,06E+00	3,14E+01	6,20E+01
J _{nr diff 10-3,2}		3,85E+01	2,28E+01	2,61E+01	2,56E+01	2,36E+01	1,82E+01	2,24E+01	2,53E+01
5%SBS RTFOT		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,47E+01	4,98E+01	7,47E+01	7,46E+01	5,10E+01	4,41E+01	4,62E+01	6,38E+01
R _{3,2kPa}		3,99E+00	2,93E+00	1,59E+00	-2,65E-04	8,72E+00	3,65E+01	4,23E+01	6,13E+01
R _{10kPa}		-3,79E+00	-7,41E-01	-2,61E+00	-2,31E+00	4,70E-01	2,49E+01	3,33E+01	5,87E+01
R _{diff 0,1-3,2}		9,47E+01	7,06E+01	9,83E+01	9,88E+01	8,29E+01	1,71E+01	8,47E+00	3,87E+00
R _{diff 0,1-10,0}		1,05E+02	7,61E+01	1,04E+02	1,03E+02	9,62E+01	4,36E-01	2,79E+01	7,84E+00
R _{diff 3,2-10,0}		1,95E+02	9,39E+01	-6,84E+01	1,17E+02	7,76E+01	3,20E+01	2,12E+01	2,12E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,90E-03	1,28E-03	1,35E-03	1,20E-03	9,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,21E-02	7,00E-03	7,93E-03	7,58E-03	1,95E-03	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,78E-02	7,20E-03	1,11E-02	1,03E-02	2,53E-03	4,00E-04	2,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	5,43E+02	2,26E+02	4,22E+02	5,21E+02	1,20E+02	1,71E+01	8,10E+00	7,22E+00
J _{nr diff 10-0,1}		5,65E+02	3,40E+02	4,51E+02	7,41E+02	1,90E+02	5,24E+01	3,11E+01	1,59E+01
J _{nr diff 10-3,2}		4,66E+01	2,53E+01	4,03E+01	3,51E+01	3,11E+01	3,02E+01	2,12E+01	8,11E+00

5%SBS RTFOT +WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,38E+01	9,35E+01	9,31E+01	8,99E+01	8,53E+01	8,19E+01	1,23E+02	1,47E+02
R _{3,2kPa}		4,98E+01	4,26E+01	5,21E+01	5,82E+01	6,27E+01	6,71E+01	7,52E+01	7,17E+01
R _{10kPa}		5,48E+00	8,12E+00	1,28E+01	1,98E+01	3,08E+01	4,68E+01	7,02E+01	6,98E+01
R _{diff 0,1-3,2}		4,06E+01	5,44E+01	4,40E+01	3,53E+01	2,61E+01	1,80E+01	3,88E+01	5,13E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,35E+01	9,10E+01	8,62E+01	7,80E+01	6,39E+01	4,29E+01	4,28E+01	5,25E+01
R _{diff 3,2-10,0}		8,90E+01	8,09E+01	7,54E+01	6,60E+01	5,09E+01	3,03E+01	6,60E+00	2,58E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		4,00E-04	4,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,70E-03	1,00E-03	6,00E-04	3,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	4,17E+02	9,00E+02	5,80E+02	2,91E+02	1,34E+02	6,91E+01	2,28E+02	1,70E+02
J _{nr diff 10-0,1}		2,37E+03	2,46E+03	1,52E+03	7,62E+02	3,50E+02	1,60E+02	2,34E+02	1,66E+02
J _{nr diff 10-3,2}		3,83E+02	1,56E+02	1,38E+02	1,22E+02	9,27E+01	5,37E+01	5,20E+00	6,57E+00
5%SBS RTFOT +WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,73E+01	9,23E+01	9,30E+01	9,50E+01	9,04E+01	9,80E+01	9,70E+01	1,69E+02
R _{3,2kPa}		3,94E+01	5,16E+01	6,80E+01	7,16E+01	6,99E+01	7,90E+01	7,90E+01	7,80E+01
R _{10kPa}		9,39E+00	1,68E+01	2,70E+01	3,80E+01	4,45E+01	6,50E+01	6,70E+01	7,70E+01
R _{diff 0,1-3,2}		5,49E+01	4,41E+01	2,70E+01	2,46E+01	2,20E+01	1,90E+01	3,88E+01	5,30E+01
R _{diff 0,1-10,0}		8,92E+01	8,18E+01	7,10E+01	6,00E+01	5,00E+01	3,30E+01	4,28E+01	5,40E+01
R _{diff 3,2-10,0}		7,62E+01	6,74E+01	5,90E+01	4,70E+01	3,60E+01	1,70E+01	6,60E+00	2,40E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		7,00E-04	4,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	4,26E+02	4,77E+02	3,84E+02	4,51E+02	1,52E+02	1,88E+03	2,24E+02	1,41E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,15E+03	1,23E+03	1,14E+03	1,04E+03	2,48E+02	2,28E+03	2,34E+02	1,35E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,37E+02	1,31E+02	1,57E+02	1,06E+02	5,20E+01	2,00E+01	5,20E+00	1,55E+01
5%SBS RTFOT +WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,53E+01	6,87E+01	9,40E+01	9,38E+01	9,61E+01	1,21E+02	1,53E+02	2,03E+02
R _{3,2kPa}		3,16E+01	3,27E+01	5,56E+01	6,70E+01	7,86E+01	8,11E+01	8,12E+01	8,02E+01
R _{10kPa}		8,36E+00	1,09E+01	2,31E+01	3,34E+01	5,32E+01	6,63E+01	7,51E+01	7,75E+01
R _{diff 0,1-3,2}		6,30E+01	3,93E+01	4,08E+01	2,86E+01	1,82E+01	3,02E+01	4,25E+01	5,68E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,02E+01	6,31E+01	7,55E+01	6,45E+01	4,46E+01	4,31E+01	4,68E+01	5,82E+01
R _{diff 3,2-10,0}		7,35E+01	5,01E+01	5,83E+01	5,14E+01	3,24E+01	1,83E+01	7,53E+00	3,37E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		6,00E-04	2,25E-04	2,00E-04	1,50E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,17E-03	4,50E-04	3,75E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	3,43E+02	4,11E+02	6,69E+02	4,42E+02	6,27E+02	2,45E+02	1,95E+02	1,41E+02
J _{nr diff 10-0,1}		2,77E+03	1,09E+03	1,22E+03	1,02E+03	1,75E+03	2,99E+02	2,07E+02	1,42E+02
J _{nr diff 10-3,2}		9,62E+01	6,56E+01	8,85E+01	1,12E+02	9,44E+01	5,02E+01	1,25E+01	3,22E+00

7%SBS RTFOT		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,60E+01	9,20E+01	9,30E+01	9,10E+01	8,50E+01	8,30E+01	7,60E+01	9,60E+01
R _{3,2kPa}		3,10E+01	3,90E+01	6,00E+01	8,00E+01	7,90E+01	7,70E+01	7,10E+01	7,70E+01
R _{10kPa}		3,40E-01	3,91E+00	7,32E+00	1,50E+01	2,60E+01	5,60E+01	6,00E+01	7,80E+01
R _{diff 0,1-3,2}		6,30E+01	5,70E+01	3,50E+01	1,20E+01	6,54E+00	7,60E+00	7,00E+00	1,90E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,90E+01	9,50E+01	9,20E+01	8,30E+01	6,90E+01	3,10E+01	2,10E+01	1,19E+02
R _{diff 3,2-10,0}		9,80E+01	8,90E+01	8,78E+01	8,10E+01	6,60E+01	2,60E+01	1,50E+01	0,00E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	4,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		4,30E-03	2,20E-03	9,00E-04	2,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,20E-03	6,00E-03	3,50E-03	1,70E-03	8,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	8,66E+02	1,24E+03	6,56E+02	1,37E+02	4,00E+01	4,20E+01	2,50E+01	6,10E+01
J _{nr diff 10-0,1}		2,43E+03	3,60E+03	3,01E+03	1,54E+03	5,58E+02	1,97E+02	8,50E+01	6,20E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,61E+02	1,76E+02	3,11E+02	5,91E+02	3,67E+02	1,08E+02	4,80E+01	1,06E+00
7%SBS RTFOT +WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,30E+01	9,50E+01	1,00E+02	1,04E+02	1,07E+02	1,06E+02	1,02E+02	1,31E+02
R _{3,2kPa}		7,30E+01	8,50E+01	9,20E+01	9,50E+01	9,60E+01	9,60E+01	9,50E+01	9,10E+01
R _{10kPa}		3,10E+01	4,40E+01	6,60E+01	8,20E+01	8,30E+01	9,30E+01	9,30E+01	9,00E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,10E+01	9,00E+00	7,98E+00	8,00E+00	6,54E+00	9,00E+00	6,80E+00	3,00E+01
R _{diff 0,1-10,0}		6,10E+01	5,20E+01	3,40E+01	2,00E+01	6,90E+01	1,10E+01	8,10E+00	3,00E+01
R _{diff 3,2-10,0}		5,60E+01	4,70E+01	2,80E+01	1,30E+01	6,60E+01	2,00E+00	1,30E+00	7,00E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		3,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	9,20E+01	2,98E+02	6,67E+02	2,99E+02	3,00E+02	1,93E+02	4,38E+02	1,35E+02
J _{nr diff 10-0,1}		7,32E+02	1,89E+03	3,20E+01	8,65E+02	8,50E+02	2,70E+02	5,64E+02	1,40E+02
J _{nr diff 10-3,2}		3,33E+02	3,99E+02	3,91E+02	2,82E+02	2,30E+02	8,20E+01	3,70E+01	1,40E+01
7%SBS RTFOT +WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,96E+01	7,18E+01	9,89E+01	1,07E+02	1,16E+02	1,23E+02	1,27E+02	1,28E+02
R _{3,2kPa}		7,20E+01	4,39E+01	9,36E+01	9,62E+01	9,63E+01	9,54E+01	9,32E+01	9,06E+01
R _{10kPa}		3,84E+01	4,58E+01	8,08E+01	8,95E+01	9,30E+01	9,34E+01	9,21E+01	9,02E+01
R _{diff 0,1-3,2}		1,96E+01	6,58E+00	5,25E+00	9,69E+00	1,69E+01	2,25E+01	2,63E+01	2,85E+01
R _{diff 0,1-10,0}		5,71E+01	2,71E+01	1,82E+01	1,60E+01	1,98E+01	2,41E+01	2,72E+01	2,88E+01
R _{diff 3,2-10,0}		4,67E+01	2,25E+01	1,37E+01	6,95E+00	3,48E+00	2,02E+00	1,17E+00	4,98E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,00E-04	7,50E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,76E+02	2,14E+02	3,86E+02	2,42E+02	1,44E+02	1,36E+02	1,45E+02	1,56E+02
J _{nr diff 10-0,1}		2,77E+03	1,35E+03	1,35E+03	4,36E+02	1,75E+02	1,50E+02	1,53E+02	1,61E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,62E+02	1,43E+02	1,56E+02	1,35E+02	7,22E+01	3,80E+01	1,79E+01	8,22E+00

7%SBS RTFOT +WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,60E+01	9,50E+01	9,90E+01	1,06E+02	1,18E+02	1,28E+02	1,44E+02	1,75E+02
R _{3,2kPa}		5,50E+01	6,90E+01	8,30E+01	9,00E+00	9,50E+01	9,40E+01	9,30E+01	8,90E+01
R _{10kPa}		2,00E+01	3,40E+01	5,20E+01	6,80E+01	8,40E+01	8,70E+01	9,00E+01	8,60E+01
R _{diff 0,1-3,2}		3,50E+01	2,60E+01	1,50E+01	1,40E+01	1,90E+01	2,60E+01	3,50E+01	4,90E+01
R _{diff 0,1-10,0}		7,50E+01	6,40E+01	4,70E+01	3,50E+01	2,80E+01	3,10E+01	3,70E+01	5,04E+01
R _{diff 3,2-10,0}		6,20E+01	5,10E+01	3,70E+01	2,40E+01	1,10E+01	6,78E+00	3,60E+00	2,80E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		4,00E-04	2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,69E+02	7,46E+02	9,81E+03	4,91E+02	1,70E+02	1,46E+02	1,28E+02	1,23E+02
J _{nr diff 10-0,1}		5,23E+02	1,95E+03	2,80E+01	1,30E+03	3,14E+02	1,95E+02	1,45E+02	1,29E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,31E+02	1,42E+02	1,86E+02	2,06E+02	2,04E+02	1,06E+02	6,00E+01	2,70E+01
9%SBS RTFOT		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,20E+01	7,18E+01	9,66E+01	9,67E+01	9,47E+01	9,40E+01	1,05E+02	1,23E+02
R _{3,2kPa}		6,35E+01	5,99E+01	8,00E+01	8,54E+01	8,43E+01	9,32E+01	8,84E+01	8,62E+01
R _{10kPa}		4,99E+00	6,22E+00	1,76E+01	3,34E+01	4,73E+01	7,88E+01	8,44E+01	8,69E+01
R _{diff 0,1-3,2}		2,14E+01	1,24E+01	1,72E+01	1,17E+01	1,13E+01	9,08E-01	1,55E+01	2,98E+01
R _{diff 0,1-10,0}		9,21E+01	6,85E+01	8,18E+01	6,57E+01	5,07E+01	1,62E+01	1,94E+01	2,92E+01
R _{diff 3,2-10,0}		9,12E+01	6,76E+01	7,86E+01	6,19E+01	4,57E+01	1,54E+01	4,58E+00	-7,83E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	2,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		8,00E-04	2,50E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		8,43E-03	4,48E-03	2,10E-03	1,50E-03	4,25E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	2,89E+02	3,55E+02	5,42E+02	3,40E+02	2,22E+02	1,43E+01	3,58E+02	1,64E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,25E+03	8,21E+03	6,06E+03	2,45E+03	1,54E+03	2,80E+02	4,62E+02	1,62E+02
J _{nr diff 10-3,2}		8,97E+02	4,77E+02	3,82E+02	2,06E+02	4,11E+02	2,32E+02	4,00E+01	3,19E+00
9%SBS RTFOT +WW		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	6,97E+01	9,36E+01	1,04E+02	1,00E+02	1,11E+02	1,13E+02	1,06E+02	1,19E+02
R _{3,2kPa}		5,51E+01	8,24E+01	9,11E+01	9,45E+01	9,69E+01	9,75E+01	9,70E+01	9,57E+01
R _{10kPa}		4,69E+01	6,12E+01	7,75E+01	8,77E+01	9,32E+01	9,55E+01	9,60E+01	9,52E+01
R _{diff 0,1-3,2}		2,09E+01	1,20E+01	1,21E+01	5,89E+00	1,24E+01	1,34E+01	9,07E+00	1,95E+01
R _{diff 0,1-10,0}		3,27E+01	3,47E+01	2,52E+01	1,26E+01	1,57E+01	1,51E+01	9,97E+00	1,99E+01
R _{diff 3,2-10,0}		1,50E+01	2,57E+01	1,49E+01	7,15E+00	3,81E+00	1,95E+00	9,93E-01	4,40E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	5,90E+01	2,87E+02	6,67E+02	3,05E+02	1,63E+02	1,37E+02	1,75E+02	1,34E+02
J _{nr diff 10-0,1}		1,24E+02	9,44E+02	1,71E+03	7,32E+03	2,48E+02	1,72E+02	2,21E+02	1,40E+02
J _{nr diff 10-3,2}		4,08E+01	1,69E+02	1,84E+02	1,45E+02	1,35E+02	9,51E+01	4,79E+01	1,99E+01

9%SBS RTFOT +WB		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	7,54E+01	9,64E+01	1,02E+02	1,08E+02	1,11E+02	1,10E+02	1,20E+02	1,22E+02
R _{3,2kPa}		5,48E+01	7,83E+01	8,77E+01	9,32E+01	9,58E+01	9,68E+01	9,63E+01	9,51E+01
R _{10kPa}		4,09E+01	5,61E+01	7,37E+01	8,49E+01	9,12E+01	9,42E+01	9,50E+01	9,44E+01
R _{diff 0,1-3,2}		2,73E+01	1,88E+01	1,48E+01	1,40E+01	1,40E+01	1,21E+01	2,00E+01	2,19E+01
R _{diff 0,1-10,0}		4,58E+01	4,19E+01	2,81E+01	2,16E+01	1,81E+01	1,45E+01	2,11E+01	2,24E+01
R _{diff 3,2-10,0}		2,55E+01	2,84E+01	1,60E+01	8,88E+00	4,80E+00	2,76E+00	1,38E+00	7,40E-01
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		1,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,48E+02	1,14E+03	1,54E+03	3,25E+02	1,92E+02	1,64E+02	1,32E+02	1,35E+02
J _{nr diff 10-0,1}		2,83E+02	2,59E+03	3,29E+02	6,07E+02	2,96E+02	2,25E+02	1,47E+02	1,43E+02
J _{nr diff 10-3,2}		5,45E+01	1,17E+02	1,21E+02	1,26E+02	1,13E+02	9,49E+01	4,55E+01	2,18E+01
9%SBS RTFOT +WG		Temperatura, °C							
		82	76	70	64	58	52	46	40
R _{0,1kPa}	%	8,70E+01	9,60E+01	1,04E+02	1,13E+02	1,20E+02	1,21E+02	1,23E+02	1,26E+02
R _{3,2kPa}		6,70E+01	8,10E+01	9,10E+01	9,50E+01	9,70E+01	9,70E+01	9,70E+01	9,50E+01
R _{10kPa}		3,50E+01	5,20E+01	7,20E+01	8,50E+01	9,20E+01	9,50E+01	9,50E+01	9,40E+01
R _{diff 0,1-3,2}		2,30E+01	1,50E+01	1,20E+01	1,50E+01	1,90E+01	1,90E+01	2,10E+01	2,40E+01
R _{diff 0,1-10,0}		6,00E+01	4,50E+01	3,00E+01	2,40E+01	2,30E+01	2,10E+01	2,20E+01	2,50E+01
R _{diff 3,2-10,0}		4,70E+01	3,50E+01	2,00E+01	1,00E+01	5,00E+00	2,80E+00	1,73E+00	1,15E+00
J _{nr (0,1)}	1/kPa	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (3,2)}		1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr (10,0)}		2,00E-04	1,00E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
J _{nr diff 3,2-0,1}	%	1,45E+02	8,20E+02	6,67E+02	1,98E+02	1,35E+02	1,23E+02	1,25E+02	1,30E+02
J _{nr diff 10-0,1}		4,74E+02	2,47E+03	1,97E+03	4,58E+02	2,16E+02	1,59E+02	1,45E+02	1,41E+02
J _{nr diff 10-3,2}		1,34E+02	1,79E+02	2,28E+02	2,64E+02	2,32E+02	1,54E+02	7,70E+01	3,60E+01

Zał. B.1. Wartości parametrów modeli 4 i 6 parametrycznych dla asfaltu 50/70 i mastyksów sporządzonych z jego udziałem, na podstawie badania relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C w duktylometrze.

		50/70	50/70+WG	50/70+WB	50/70+WW	50/70 RTFOT	50/70 RTFOT+WG	50/70 RTFOT+WB	50/70 RTFOT+WW
MODEL 4 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999615679	0,999818397	0,999723997	0,999486466	0,999755225	0,999167261	0,999242752	0,999407297
	RMS Error	1317,751825	886,1465297	1011,905842	1313,665995	1011,805462	1947,62186	1585,099488	1615,609808
	SSq	10413609817	4709178265	6140648733	10349132926	6139430501	22748005761	15067704708	15653339722
	Moduł sprężystości E ₀	6161525,626	26029757,2	29699133,15	36378000,14	9240999,529	32800448,11	29134415,1	29218462,81
	Moduł sprężystości E ₁	63557783,99	66264729,75	61735742,04	59152288,38	54009765,76	76923235,03	82697104,75	75692618,26
	Lepkość dynamiczna η ₁	429384626,1	1413715751	1411899713	1794113899	395635687,4	1947218890	1284222688	1347117872
	β	0,44680757	0,525973447	0,520122561	0,552244667	0,447637451	0,544742354	0,426746432	0,495836333
		50/70	50/70+WG	50/70+WB	50/70+WW	50/70 RTFOT	50/70 RTFOT+WG	50/70 RTFOT+WB	50/70 RTFOT+WW
MODEL 6 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999941404	0,999871303	0,999855939	0,999532024	0,99997554	0,999710455	0,999236046	0,999516712
	RMS Error	514,6290885	746,1058732	731,1872805	1254,251698	319,9022591	1148,631671	1592,369288	1459,128564
	SSq	1587734377	3337260474	3205135861	9431018197	613513045	7909531522	15201161505	12763691718
	Moduł sprężystości E ₀	6330317,306	6330317,306	6330317,306	6330317,306	6330317,306	41106690,81	6330317,306	6330317,306
	Moduł sprężystości E ₁	32103604,72	32103604,72	32103604,72	32103604,72	32103604,72	49905809,52	32103604,72	32103604,72
	Lepkość dynamiczna η ₁	939826454,8	939826454,8	939826454,8	939826454,8	939826454,8	11118961266	939826454,8	939826454,8
	Moduł sprężystości E ₂	25997072,22	25997072,22	25997072,22	25997072,22	25997072,22	16835836,53	25997072,22	25997072,22
	Lepkość dynamiczna η ₂	194827105,4	194827105,4	194827105,4	194827105,4	194827105,4	333387852,6	194827105,4	194827105,4
β	0,62998918	0,62998918	0,62998918	0,62998918	0,62998918	0,894333908	0,62998918	0,62998918	

Załącznik B.2. Wartości parametrów modeli 4 i 6 parametrycznych dla asfaltu 3%SBS i mastyksów sporządzonych z jego udziałem, na podstawie badania relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C w duktylometrze.

		3%SBS	3%SBS+WG	3%SBS+WB	3%SBS+WW	3%SBS RTFOT	3%SBS RTFOT+WG	3%SBS RTFOT+WB	3%SBS RTFOT+WW
MODEL 4 PARAMETROWY (t ⁶)	R ²	0,999290400	0,999901389	0,999935580	0,999769700	0,999605343	0,999874026	0,999463265	0,999798716
	RMS Error	1750,8235862	725,827312729	540,716016142	967,105479731	1284,172084652	744,120724413	1491,246765198	1011,738075191
	SSq	18382977165,39	3159371251,55	1753365739,24	5608952174,52	9889640364,17	3320632768,05	13336230037,54	6138612754,95
	Moduł sprężystości E ₀	3576636,52	17072902,38	20651445,19	26996298,36	8496714,78	22906757,60	29961270,15	23430454,78
	Moduł sprężystości E ₁	48597235,51	86419512,51	72272105,57	78627679,75	61733197,62	73866590,45	86789422,31	92831130,10
	Lepkość dynamiczna η ₁	291735269,26	1252031391,81	1192959087,37	1549801716,77	400423799,62	1294145841,43	1225893002,54	1305190497,39
	β	0,45000778722	0,468119018	0,464786920	0,476373386	0,433134473	0,472253130	0,446421434	0,462467540

		3%SBS	3%SBS+WG	3%SBS+WB	3%SBS+WW	3%SBS RTFOT	3%SBS RTFOT+WG	3%SBS RTFOT+WB	3%SBS RTFOT+WW
MODEL 6 PARAMETROWY (t ⁶)	R ²	0,999941902	0,999937172	0,999947492	0,999806470	0,999971495	0,999554616	0,999554616	0,999861134
	RMS Error	501,055379140	579,455739741	488,250914712	886,693877776	345,179161198	1358,761889277	1358,761889277	840,491532256
	SSq	1505083675,33	2012934881,14	1429141789,52	4713425067,15	714296176,68	11068172061,16	11068172061,16	4235023964,68
	Moduł sprężystości E ₀	3772592,99	16701545,16	23304533,08	34294665,18	8606504,53	16336565,26	16336565,26	28822223,63
	Moduł sprężystości E ₁	21813242,96	63619207,76	58223511,00	56612036,07	30898134,91	60345560,69	60345560,69	64528063,62
	Lepkość dynamiczna η ₁	181485378,69	2208895479,75	2001631817,67	3861171080,15	895909341,88	7570965227,70	7570965227,70	3412314904,94
	Moduł sprężystości E ₂	21381496,75	20676649,40	9932567,18	12428571,98	25434801,07	34420726,93	34420726,93	19210220,34
	Lepkość dynamiczna η ₂	781391076,23	191059520,14	67495115,22	119733405,70	184043267,24	581263913,55	581263913,55	166742243,82
β	0,686541295	0,565104320	0,567588717	0,668583798	0,616526417	0,635937404	0,635937404	0,657341556	

Załącznik B.3. Wartości parametrów modeli 4 i 6 parametrycznych dla asfaltu 5%SBS i mastyksów sporządzonych z jego udziałem, na podstawie badania relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C w duktylometrze..

		5%SBS	5%SBS+WG	5%SBS+WB	5%SBS+WW	5%SBS RTFOT	5%SBS RTFOT+WG	5%SBS RTFOT+WB	5%SBS RTFOT+WW
MODEL 4 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999475521	0,999882328	0,999698854	0,999918954	0,999648711	0,999758406	0,999804303	0,999870885
	RMS Error	1499,099487	747,4955209	1267,583688	673,1869641	1271,254664	1126,524349	1009,86466	797,1652037
	SSq	13477053725	3350821074	9635790126	2717724590	9691682255	7610535488	6115900309	3810927755
	Moduł sprężystości E ₀	3438605,837	27189321,52	21019431,18	18677468,98	5489421,008	13976639,88	20781236,77	19559734,33
	Moduł sprężystości E ₁	44271453,69	74610808,19	83128347,74	78330570,46	53153370,16	90595934,22	81487705,32	80865876,14
	Lepkość dynamiczna η ₁	283704132,2	1216212552	1191789544	558248889,1	356364638,2	1319681409	1161727877	1157338892
	β	0,45879244	0,514335825	0,486783162	0,444037913	0,434583658	0,441693509	0,470290453	0,471154014
		5%SBS	5%SBS+WG	5%SBS+WB	5%SBS+WW	5%SBS RTFOT	5%SBS RTFOT+WG	5%SBS RTFOT+WB	5%SBS RTFOT+WW
MODEL 6 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999857649	0,999897593	0,999892982	0,999951751	0,999975748	0,999905648	0,999889421	0,99994938
	RMS Error	781,1228424	697,4447079	755,7673992	519,5017128	334,0745068	704,1201375	759,2421816	499,2234458
	SSq	3657866605	2916142578	3424250248	1617942767	669076627,6	2972232083	3455809898	1494098173
	Moduł sprężystości E ₀	3185654,535	27199307,09	22995873,73	19966087,42	6056819,836	23870175,12	24589462,01	22796135,58
	Moduł sprężystości E ₁	21626896,57	57882882,23	52192786,18	58507587,73	27678737,03	55058777,11	54664465,39	54647931,14
	Lepkość dynamiczna η ₁	156171260,3	1748452469	3817374848	1979045750	941146472,1	5669491764	3333916083	3167092199
	Moduł sprężystości E ₂	19538382,71	15189630,14	24149757	15322073,58	20205114,33	20209175,48	19080949,69	19129106,61
	Lepkość dynamiczna η ₂	455286074,5	147630578,9	343122511,5	111573285	151564196,4	272927597,9	206059195,8	206680081,4
	β	0,600804758	0,585933475	0,702375635	0,6500066	0,649235844	0,737484908	0,675700666	0,664689122

Zał. B.4. Wartości parametrów modeli 4 i 6 parametrych dla asfaltu 7%SBS i mastyksów sporządzonych z jego udziałem, na podstawie badania relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C w duktylometrze..

		7%SBS	7%SBS+WG	7%SBS+WB	7%SBS+WW	7%SBS RTFOT	7%SBS RTFOT+WG	7%SBS RTFOT+WB	7%SBS RTFOT+WW
MODEL 4 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999284621	0,999773314	0,999903239	0,999890596	0,999198363	0,999763323	0,999782445	0,999763323
	RMS Error	1654,11545	1083,975299	681,9844898	813,7973097	1834,64723	1084,875629	1040,587185	1084,875629
	SSq	16408379248	7046489688	2789221757	3971609570	20185484952	7058199922	6493681674	7058199922
	Moduł sprężystości E ₀	2126272,7	14135198,95	15021127,19	12254104,24	2934139,192	20371242,62	18620126,06	11728161
	Moduł sprężystości E ₁	24765039,88	60316011,84	79714224,23	82686919,76	34351996,83	79527218,13	76741922,44	83897099,77
	Lepkość dynamiczna η ₁	133076216,5	820008967,2	772859232,4	1074260809	193735834,2	971185622,7	930847271,2	1024550575
	β	0,418807034	0,523508996	0,453524	0,47788606	0,424805686	0,461026245	0,459284875	0,461026245

		7%SBS	7%SBS+WG	7%SBS+WB	7%SBS+WW	7%SBS RTFOT	7%SBS RTFOT+WG	7%SBS RTFOT+WB	7%SBS RTFOT+WW
MODEL 6 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999975776	0,999932545	0,999961456	0,999945012	0,999970951	0,999868507	0,999891391	0,999868507
	RMS Error	304,4351434	591,4044414	430,5033755	577,0425405	349,3030184	808,7723405	735,3571242	808,7723405
	SSq	555621135,3	2096806484	1111072272	1996203671	731465529,1	3921405629	3241796851	3921405629
	Moduł sprężystości E ₀	2144060,781	15732242,48	15364605,72	14571150,86	2646722,632	22563268,23	20503215,92	14040634,58
	Moduł sprężystości E ₁	11300109,01	41685477,47	53708204,6	57251704,47	17052235,1	51681769,42	49814312,59	54521592,32
	Lepkość dynamiczna	80209438,38	2207416517	1340088402	2494850715	130693234	2617346757	2471864498	2761165386
	Moduł sprężystości E ₂	10740262,98	15233501,44	22318837,55	19566969,94	13956538,95	21302489,82	20848141,77	22473024,4
	Lepkość dynamiczna η ₂	327869202,9	132790321,1	155548306,1	175636348,8	442151427,9	216738519,4	211609822,1	228647922,2
	β	0,6320674	0,727744081	0,567766304	0,645385961	0,618191954	0,651139073	0,644836449	0,651139073

Zał. B.5. Wartości parametrów modeli 4 i 6 parametrycznych dla asfaltu 9%SBS i mastyksów sporządzonych z jego udziałem, na podstawie badania relaksacji w warunkach stałego odkształcenia w temperaturze -12°C w duktylometrze.

		9%SBS	9%SBS+WG	9%SBS+WB	9%SBS+WW	9%SBS RTFOT	9%SBS RTFOT+WG	9%SBS RTFOT+WB	9%SBS RTFOT+WW
MODEL 4 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999486134	0,999668008	0,99946229	0,999527671	0,998900397	0,999633752	0,999321668	0,99965833
	RMS Error	1406,633055	1212,453077	1501,312194	1513,301877	2047,333054	1291,952039	1639,395187	1304,38726
	SSq	11865763451	8815844653	13516868001	13733625174	25136861088	10009833003	16117636627	10203452466
	Moduł sprężystości E ₀	1398822,104	10810727,3	10027572,07	9676291,171	2568207,511	12665118,84	6965566,94	10316543,3
	Moduł sprężystości E ₁	11715682,22	70589855,45	66959970,05	78330570,46	30415280,04	78563389,51	58636239,84	78932234,78
	Lepkość dynamiczna η ₁	73323002,63	486396620,7	405564276,3	558248889,1	162156161,2	599003856,1	318609395,3	601990563,5
	β	0,428656906	0,433382752	0,427438533	0,444037913	0,428972461	0,437850128	0,418145718	0,445312989

		9%SBS	9%SBS+WG	9%SBS+WB	9%SBS+WW	9%SBS RTFOT	9%SBS RTFOT+WG	9%SBS RTFOT+WB	9%SBS RTFOT+WW
MODEL 6 PARAMETROWY (t ^β)	R ²	0,999930192	0,999974185	0,999966798	0,999951395	0,99994372	0,999969339	0,999910486	0,999984184
	RMS Error	518,5391554	338,1516256	373,1223774	485,5302505	463,2559729	373,87256	595,6361185	280,6915753
	SSq	1611952720	685507398,8	834625749,7	1413259047	1286563548	837985243,4	2126920402	472332624
	Moduł sprężystości E ₀	1461852,878	11215623,94	10106907,66	9455208,022	2229414,487	12955913,23	6828515,396	10566788,02
	Moduł sprężystości E ₁	5682098,153	36980896,15	31312260,49	37864578,25	16350442,36	41218628,46	26888822,19	41171496,3
	Lepkość dynamiczna η ₁	189006643	1164929560	977409806,4	1302649769	127602120	1545634586	176678305,6	1481521853
	Moduł sprężystości E ₂	4833978,231	27292632,97	29040163,6	33902520,14	10957382,51	30514515,38	26142395,11	31055374,21
	Lepkość dynamiczna η ₂	36789108,5	204373119,7	216446378,1	290058140,8	355411835,1	263978199,8	686562490,2	267266473,1
β	0,64061205	0,624705421	0,628253243	0,629778215	0,624776657	0,633840087	0,603843911	0,636933194	