



# RAZVOJ SPECIFIKACIJA ZA BITUMEN

## Kako predvideti ponašanje u fazi eksploatacije?



Osnovni cilj prilikom razvoja novih metoda ispitivanja bitumena je da se odrede karakteristike veziva koje su vezane za ponašanje asfaltnih slojeva u fazi eksploatacije i za nastanak dominantnih oštećenja na fleksibilnim kolovoznim konstrukcijama: kolotruga, pukotina usled zamora i termičkih pukotina. Ova ispitivanja je neophodno sprovesti pri različitim nivoima starenja, koje treba da simulira eksploatacione uslove za bitumen i asfaltne mešavine tokom njihovog životnog veka.

U radu je prikazan razvoj specifikacija za ispitivanje putnih i polimer modifikovanih bitumena, kao i savremeni postupci za ispitivanje karakteristika bitumena koji se primenjuju u Sjedinjenim Američkim Državama, u kontekstu unapređenja specifikacija Superpave, kao i u Evropi, pre svega imajući u vidu očekivano novo izdanje standarda EN 14023 koji se odnosi na polimer modifikovane bitumene. Posebno su obrađene metode za karakterizaciju veziva na visokim eksploatacionim temperaturama, kao što su metoda MSCR (Multiple Stress Creep Recovery), razvijena u SAD i Brza metoda za karakterizaciju bitumena BTSV razvijena u Nemačkoj. Na kraju je dat pregled novouvedenih ispitivanja u okviru predloga specifikacija za polimer modifikovane bitumene.

### Uvod

Kolovozne konstrukcije na putevima i aerodromskim manevarskim površinama su izložene sve oštrijim eksploatacionim uslovima, kako u pogledu intenziteta i broja prelaza osovinskih opterećenja, tako i u pogledu uslova okoline u kontekstu klimatskih promena, koji su karakterisani porastom temperature i frekventnim ekstremnim događajima sa vrlo visokim ili vrlo niskim temperaturama odnosno kratkim periodima sa izuzetno velikim intenzitetom padavina. S obzirom na to da je u Srbiji najveći deo putne mreže izgrađen sa fleksibilnim kolovoznim konstrukcijama, ovaj rad će se fokusirati na ispitivanje karakteristika bitumena koji značajno utiče na ponašanje i trajnost fleksibilnih kolovoznih konstrukcija kao sastavni deo asfaltnih mešavina.

U evropskim državama su u poslednjih dvadesetak godina implementirane specifikacije za bitumen i asfaltne mešavine u skladu sa Direktivom EU o građevinskim materijalima i setom harmonizovanih normi kojima su definisani tehnički uslovi za različite tipove asfaltnih mešavina. Svaka država treba da donese odgovarajući podzakonski akt kojim propisuje zahtevane karakteristike bitumena i asfaltnih mešavina na projektima putne infrastrukture. Pri tome se teži da se u određenoj meri implementiraju specifikacije koje su povezane sa ponašanjem asfaltnih mešavina u fazi eksploatacije. Sličan pristup je u poslednjih tridesetak godina prisutan i u SAD, a započeo je razvojem novih specifikacija za klasifikaciju bitumena devedesetih godina prošlog veka.

Stoga, cilj rada je da prikaže evoluciju postupaka za ispitivanje bitumena u Evropi i SAD, sa akcentom na novi pristup specifikacijama koje povezuju ispitivanja u laboratoriji i ponašanje asfaltnih

slojeva u fazi eksploatacije, tzv. *Performance related specifications*.

Osnovna oštećenja koja nastaju na fleksibilnim konstrukcijama su rezultat dejstva saobraćajnog opterećenja ili faktora sredine, i uključuju nastanak kolotruga i pukotina, pri čemu se pukotine mogu podeliti na one nastale usled dejstva saobraćajnog opterećenja, tzv. pukotine usled zamora koje su karakteristične za zonu tragova točkova; poprečne pukotine nastale usled niskih temperatura, tzv. termičke pukotine i na pukotine koje su rezultat starenja materijala, kao što su blok pukotine.

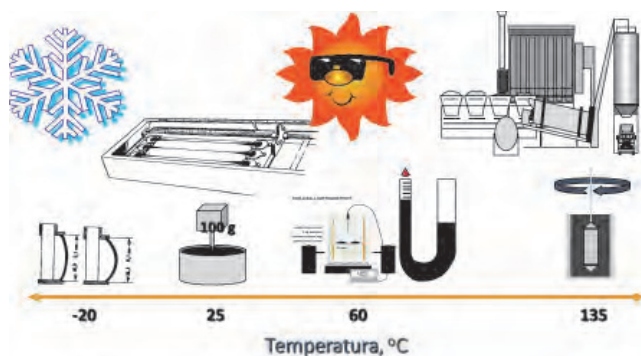
Bitumen, koji čini relativno mali deo asfaltna mešavine (okvirno od 4% do 5,5% u pogledu mase), u znatnoj meri utiče na ponašanje asfaltnih mešavina odnosno asfaltnih slojeva u fazi eksploatacije i na njihovu trajnost. Bitumen je po svojoj prirodi visko-elasto-plastičan materijal čije karakteristike zavise od temperature i od frekvencije (trajanja) opterećenja i svojim učešćem u asfaltnoj mešavini takođe utiče na to da se i asfaltna mešavina ponašaju na sličan način, tako da "odgovor" asfaltnih mešavina na uticaje izazvane saobraćajnim opterećenjem u datim uslovima sredine umnogome zavisi od karakteristika primenjenog bitumena.

Prilikom projektovanja fleksibilnih kolovoznih konstrukcija mora se voditi računa o karakteristikama materijala u slojevima konstrukcije i konstrukciji u celini u rasponu temperatura - od minimalnih zimskih do maksimalnih letnjih i o brzinama saobraćajnih tokova, jer oni određuju ponašanje asfaltnih slojeva. Sa porastom osovinskih opterećenja, u sve zahtevnijim uslovima sredine, postavlja se pitanje izbora bitumena i zahteva koje on mora ispuniti kako bi kolovozna konstrukcija imala trajnost i pružila odgovarajući nivo usluge tokom projektnog veka i zbog toga je sve veća primena polimer modifikovanih bitumena koji između ostalog omogućavaju proširenje temperaturnog intervala u kome imaju zadovoljavajuće karakteristike, čime se odgovara na sve oštrije eksploatacione zahteve.

## Razvoj specifikacija za bitumen

Prve specifikacije za bitumen su razvijene 1947. godine u okviru standarda ASTM D946, sa ciljem da se omogući kontrola kvaliteta bitumena kroz ispitivanje određenih njegovih fizičkih karakteristika. Ove specifikacije uključuju ispitivanje penetracije i duktiliteta na 25 °C (kao srednjoj eksploatacioni temperaturi kolovoza), ispitivanje tačke loma po Frasu, čime se određuje najniža eksploataciona temperatura asfaltnih slojeva, i ispitivanje tačke razmekšavanja po metodi prstena i kuglice ( $T_{PK}$ ) koja definiše najvišu očekivanu eksploatacionicu temperaturu kolovoza (slika 1). S obzirom na to da je penetracija bitumena smatrana njegovom najvažnijom karakteristikom, ove specifikacije su tradicionalno praćene klasifikacijom bitumena zasnovanom na penetraciji za obične, putne bitumene, ili na penetraciji i tački razmekšavanja za polimer modifikovane bitumene, koja se još uvek koristi u okviru evropske regulative.

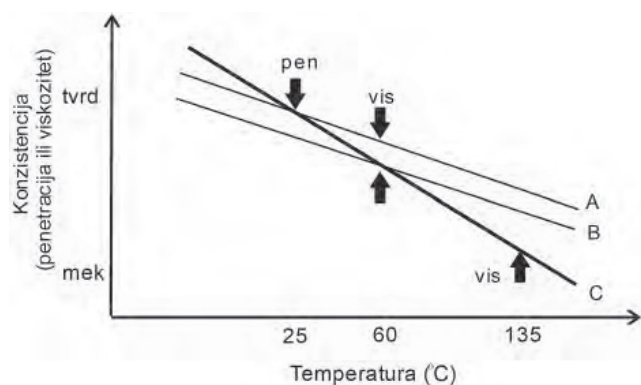
Osnovni nedostaci ovih karakteristika su što se one teško mogu povezati sa bilo kojom reološkom osobinom bitumena i što se na osnovu njih ne može dobiti informacija o ponašanju materijala na određenoj temperaturi, odnosu elastične i viskozne komponente deformacije i zavisnosti deformacije asfaltna mešavine od vremena trajanja opterećenja. Poznato



Slika 1. Empirijski opiti za karakterizaciju bitumena

je da metoda  $T_{PK}$  ne daje konzistentne rezultate prilikom ispitivanja polimer modifikovanih bitumena, kao ni za ostareo bitumen koji se nalazi u struganom asfaltu, jer je ona razvijena pre svega za putni bitumen.

Nedostatak klasifikacije na bazi penetracije je doveo do toga da su pojedine države (SAD, Australija) sredinom šezdesetih godina prošlog veka uvele novi način karakterizacije bitumena na bazi apsolutnog, dinamičkog viskoziteta, koji predstavlja fundamentalnu mehaničku karakteristiku bitumena, za razliku od penetracije. Međutim, dinamički ili apsolutni viskozitet je karakteristika idealno viskozni materijala i bitumen se tako ponaša samo na visokim temperaturama, dok na temperaturama na kojima se asfaltna mešavina nalazi u fazi eksploatacije, viskozitet bitumena zbog njegove viskoelastične prirode, zavisi i od stanja napona i od brzine nanošenja opterećenja, tako da merenje samo u jednoj tački, odnosno pod samo jednom kombinacijom ovih parametara nije dovoljno da bi se opisalo stvarno ponašanje bitumena i asfaltna mešavine u fazi eksploatacije (slika 2).



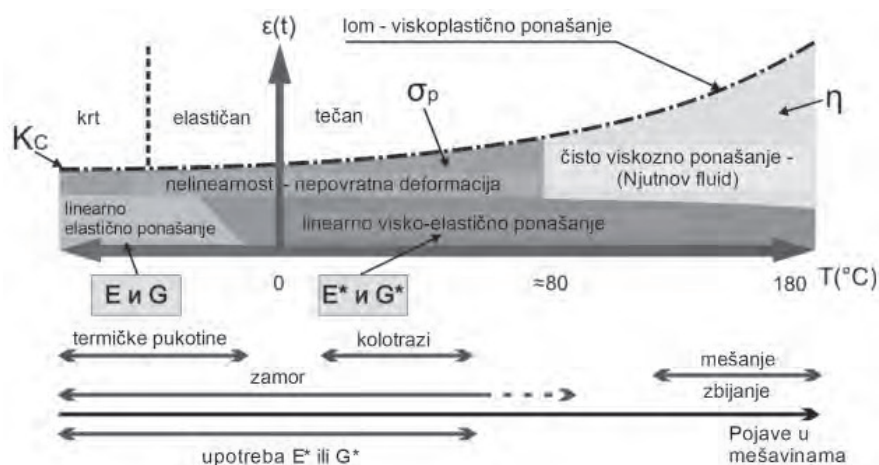
Slika 2. Nedostaci tradicionalnih sistema klasifikacije bitumena na bazi penetracije ili viskoziteta u samo jednoj tački [1]

## Superpave PG specifikacije

Devedesetih godina prošlog veka u SAD je sprovedeno istraživanje u okviru programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) koje je rezultovalo novim specifikacijama za bitumen pod nazivom *Superpave* i odgovarajućom klasifikacijom bitumena na bazi najviših i najnižih eksploatacionih temperatura, koja se naziva *Performance Grade (PG)*. Da bi se karakteristike bitumena povezale sa ponašanjem kolovoza u fazi eksploatacije, područje temperature se može podeliti u četiri zone (slika 3).

- S obzirom na činjenicu da se bitumen na visokim temperaturama (iznad 100°C) ponaša kao idealno viskozni materijal, njegovo ponašanje se može predstaviti modelom





Slika 3. Ponašanje bitumena u fazi eksploatacije zavisno od nivoa opterećenja i temperature kolovoza

Njutnovog fluida. Osnovna osobina ovog modela je da je viskozitet nezavisan od brzine nanošenja opterećenja i nivoa napona. Na ovim temperaturama se asfaltna mešavina meša i ugrađuje/zbija, tako da viskozitet predstavlja osnovni parametar za određivanje ekvivalentnih temperatura mešanja i zbijanja određene vrste bitumena.

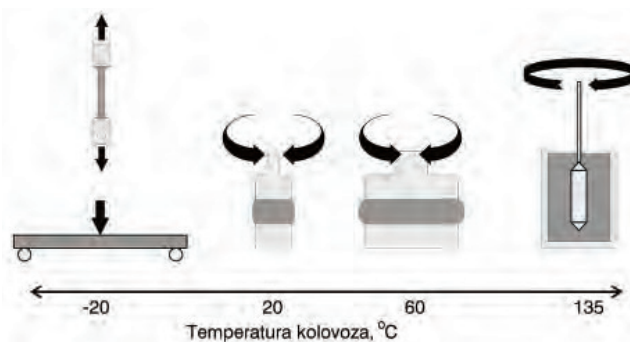
- U rasponu temperatura 45-85°C, koji predstavlja gornju zonu raspona temperature kolovoza u fazi eksploatacije, bitumen odnosno asfaltna mešavina se ponašaju kao visko-elasto-plastičan materijal i glavni mehanizam oštećenja kolovoza je trajna plastična deformacija odnosno kolotrazi. U ovoj temperaturnoj zoni karakteristike bitumena značajno zavise i od vremena trajanja opterećenja.
- U srednjem temperaturnom rasponu (0-45°C), bitumeni su generalno tvrdi i elastičniji nego na visokim temperaturama. Dominantan vid oštećenja na ovim temperaturama su pukotine usled zamora, koje su prouzrokovane ponovljenim ciklusima opterećivanja i rasterećivanja, pri čemu su nivoi opterećenja znatno manji od čvrstoće materijala pri dejstvu statičkog opterećenja. U toku svakog ciklusa opterećenja, oštećenje zavisi od nivoa napona i deformacija u materijalu, kao i od odnosa elastične i trajne komponente deformacije. Za veću otpornost na pukotine usled zamora, bolje karakteristike imaju mekši i elastičniji materijali.
- Četvrta temperaturna zona obuhvata niske temperature (<0°C) na kojima su dominantni vid oštećivanja termičke pukotine, koje su rezultat termičkih napona koji nastaju kao posledica skupljanja sloja usled hlađenja. Za vreme ciklusa hlađenja, sloj se ne može slobodno skupljati zbog trenja sa donjim slojem koji je topliji, ili ima manje skupljanje zbog manjeg koeficijenta termičke dilatacije. To trenje prouzrokuje razvoj napona zatezanja, koji mogu prevazići čvrstoću na zatezanje i prouzrokovati nastanak pukotina. Veličina napona zavisi od krutosti veziva i od njegove sposobnosti da se naponi relaksiraju kroz disipaciju energije. Tradicionalno, osetljivost na termičke pukotine je povezivana sa krutošću bitumena pod datim opterećenjem. Međutim, pomoću same krutosti se ne može opisati sposobnost relaksacije napona u vezivu.

Pored zavisnosti od temperature; karakteristike, odnosno ponašanje bitumena zavisi i od starosti asfaltna mešavine, s

obzirom na to da u toku proizvodnje i ugradnje, kao i tokom eksploatacije dolazi do starenja bitumena (isparavanja lakih ulja i oksidacije) i povećanja krutosti. Time se na visokim temperaturama povećava otpornost asfaltna mešavine na nastanak trajnih deformacija. Međutim, na srednjim i niskim temperaturama ona postaje osetljivija na nastanak pukotina usled zamora i termičkih pukotina. Stoga je sa aspekta simulacije ponašanja asfaltna mešavine tokom eksploatacionog veka potrebno utvrditi karakteristike originalnog, kratkotrajno ostarelog (čime se simulira starenje tokom procesa proizvodnje i ugrađivanja) i dugotrajno ostarelog (usled starenja tokom prvih 5 do 10 godina eksploatacije) bitumena.

Za ispitivanje bitumena po metodologiji *Superpave* koriste se četiri osnovne metode koje pokrivaju ceo temperaturni raspon primene bitumena. Te metode koriste sledeću opremu pomoću koje se mogu ispitivati nemodifikovani i modifikovani bitumeni, uključujući i veziva u kojima je modifikator raspršen, rastvoren ili je reagovao sa osnovnim bitumenom:

- reometar sa gredom opterećenom na savijanje (*Bending Beam Rheometer - BBR*);
- aparat za ispitivanje direktnog zatezanja (*Direct Tension - DT*);
- reometar za dinamičko smicanje (*Dynamic Shear Rheometer - DSR*);
- rotacioni viskozimetar (*Rotational Viscometer - RV*).

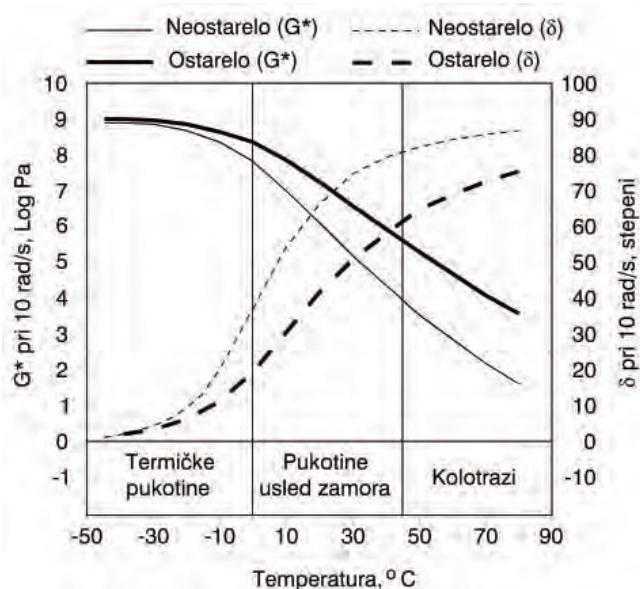


Slika 4. Osnovna ispitivanja bitumena u sistemu Superpave [2]

Pri tome je vrlo značajna temperatura na kojoj se vrši ispitivanje i da li se ono radi na originalnom, kratkotrajno ili dugotrajno ostarelom vezivu. Kratkotrajno starenje veziva odvija se u RTFO (*Rolling Thin Film Oven*) na temperaturi od 163°C i u trajanju od 85 min. Dugotrajno starenje, kojim se simulira starenje veziva u prvih 5 do 10 godina eksploatacije postiže se dodatnim starenjem veziva u posudi za starenje pod pritiskom (*Pressure Aging Vessel - PAV*) od 2100 ± 100 kPa u trajanju od 20 časova pri temperaturi od 90, 100 ili 110 °C, zavisno od srednje maksimalne nedeljne temperature kolovoza.

Ispitivanje modula smicanja  $G^*$  i faznog ugla  $\delta$  se obavlja na DSR-u, dok se ispitivanje krutosti i nagiba krive tečenja pri niskim temperaturama obavlja na BBR-u.

Kako su  $G^*$  i  $\sin \delta$  funkcije temperature i frekvencije opterećenja, prema *Superpave* specifikacijama se zahteva ispi-



Slika 5. Tipično reološko ponašanje bitumena pre i posle starenja u odnosu na glavne vidove oštećivanja kolovoza [3]

tivanje bitumena na prosečnoj sedmodnevnoj najvišoj temperaturi kolovoza pri frekvenciji od 10 rad/s, koja približno odgovara uslovima opterećenja pod dejstvom saobraćajnog opterećenja (brzina od približno 100 km/h).

Tehničkim uslovima propisani su sledeći parametri:

- vrednost parametra  $G^*/\sin \delta$  izmerena na vezivu posle starenja u RTFO mora biti veća od 2,2 kPa da bi se minimizirala mogućnost nastajanja kolotruga. Ukoliko se ne desi očekivano starenje u toku ugrađivanja, uvedeno je ograničenje da vrednost krutosti  $G^*/\sin \delta$  na novom neostarelom vezivu mora biti veća od 1 kPa pri istoj temperaturi kolovoza;

- da bi se kontrolisao zamor, vrednost parametra  $G^* \sin \delta$  nakon starenja u RTFO i PAV mora biti manja od 5.000 kPa, pri odgovarajućoj prosečnoj (tzv. "srednjoj") temperaturi kolovoza;
- da bi se kontrolisao nastanak termičkih pukotina, propisane su maksimalna vrednost za krutost  $S$  (60 s) od 300 MPa i minimalna vrednost za nagib krive krutosti  $m$  (60 s)=0,3. Na ovaj način se ograničavaju naponi i zahteva određeni stepen relaksacije.

Sušтина je da ovi uslovi moraju biti ispunjeni na odgovarajućim maksimalnim ili minimalnim temperaturama karakterističnim za putnu deonicu i asfaltni sloj u kome će biti ugrađena asfaltna mešavina sa datim bitumenom.

Ovaj koncept se pokazao uspešnim za kolovozne konstrukcije izložene umerenom obimu saobraćaja i pri normalnim brzinama saobraćajnog toka. Međutim, za uslove sporog saobraćaja ili velikog obima saobraćajnog toka bila je potrebna određena modifikacija i u originalnim specifikacijama Superpave je definisano da bitumen za takve uslove mora da zadovolji gore navedene kriterijume na temperaturama koje su za jedan ili dva nivoa viši (pri čemu svaki nivo znači temperaturu višu za 6°C), kao što je prikazano u tabeli 2.

To je bio jednostavan način da se osigura da će se za ove uslove primeniti krući bitumen. Međutim, to je u nekim slučajevima zahtevalo zadovoljenje gore navedenih kriterijuma na temperaturama koje su bile i za 12°C više od maksimalnih projektnih temperatura kolovoza, što je onda dovodilo do zahteva za visokom modifikacijom bitumena i problema pri ugrađivanju tih asfaltnih mešavina.

S druge strane, parametar  $G^*/\sin \delta$  se pokazao adekvatnim za opisivanje visko-elastičnog ponašanja običnih, putnih

Tabela 1. Uslovi za izvođenje opita prema tehničkim uslovima Superpave

Originalno/ ostarelo vezivo	Tip oštećenja	Parametar	Temperatura	Uređaj
Originalno	Ugradljivost	viskozitet $\eta$	135°C	RV
	Trajna deformacija - kolotrazi	$G^* / \sin \delta$	prosečna sedmodnevna najviša temperatura kolovoza	DSR
Kratkotrajno ostarelo RTFO	Trajna deformacija - kolotrazi	$G^* / \sin \delta$	- max T	DSR
Dugotrajno ostarelo PAV	Pukotine usled zamora	$G^* \sin \delta$	$(\max T + \min T)/2 + 4$	DSR
	Termičke pukotine	$S(t), m(t)$	minimalna temperatura kolovoza - min T	BBR, DT

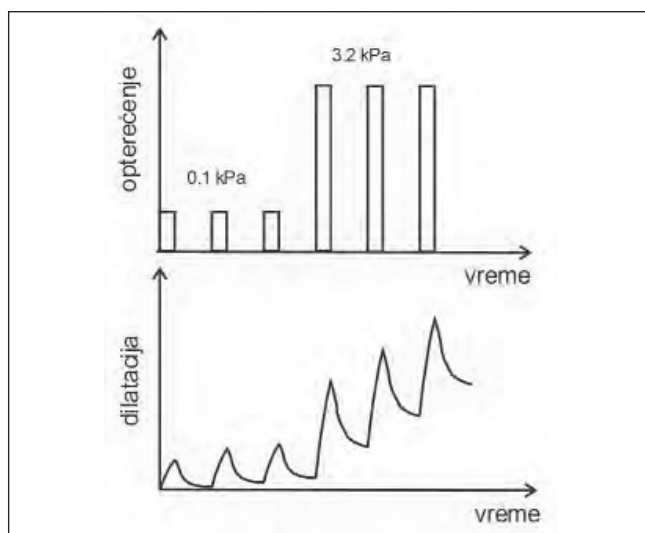
Tabela 2. Korekcija PG u funkciji od saobraćajnog opterećenja

Standardnih osovina (miliona)	Korekcija PG s obzirom na karakteristike saobraćajnog toka		
	Brzina saobraćajnog toka		
	sporo (< 20 km/h)	usporeno (20-70 km/h)	normalno (> 70 km/h)
< 0,3	-	-	-
0,3 do 3	+2	+1	-
3 do 10	+2	+1	-
10 do 30	+2	+1	-
> 30	+2	+1	+1

bitumena i definisanje njihove otpornosti na trajnu deformaciju. Međutim, on nije u mogućnosti da registruje efekte modifikacije veziva i smanjenja faznog ugla  $\delta$ , zbog njegovog srazmerno malog uticaja na ukupnu vrednost parametra  $G^*/\sin \delta$ . Zbog toga su u pojedinim državama SAD, specifikacije *Superpave* dopunjene setom, najčešće empirijskih, opita (npr. povratna elastična deformacija, duktilitet, rastvorljivost i dr.) sa ciljem da se potvrdi prisustvo modifikatora u bitumenu. Modifikovane specifikacije se vrlo često nazivaju PG Plus specifikacije i postajale su sve značajnije s obzirom na to da se u poslednjih dvadesetak godina zbog povećanog intenziteta saobraćaja i uslova sredine značajno povećala primena polimer modifikovanih bitumena.



Slika 6. Ispitivanje na DSR-u



Slika 7. Ciklusi opterećenja i rasterećenja u MSCR opitu

### Opit cikličnog smicanja sa rasterećenjem - MSCR

U okviru više istraživačkih projekata koji su usledili nakon razvoja *Superpave* metodologije, razvijen je opit za ispitivanje bitumena sa više ciklusa smicanja sa periodima rasterećenja - MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*), namenjen pre svega za ispitivanje otpornosti na trajnu deformaciju polimer modifikovanih bitumena. Ovaj opit omogućava identifikaciju modifikovanog i nemodifikovanog bitumena, kao i ocenu nelinearnog ponašanja bitumena s obzirom na to da se ispitivanje sprovodi na više nivoa naprezanja.

Ispitivanje se sprovodi na reometru za dinamičko smicanje (DSR), koji se inače koristi u metodi *Superpave*, na visokoj temperaturi (slika 6), u uslovima kontrolisanog napona na originalnom i na kratkotrajno ostarelom vezivu kao zamena za opit smicanja u okviru PG specifikacija i imajući u vidu da kolotrazi nastaju najčešće u početnom periodu eksploatacije kolovoza.

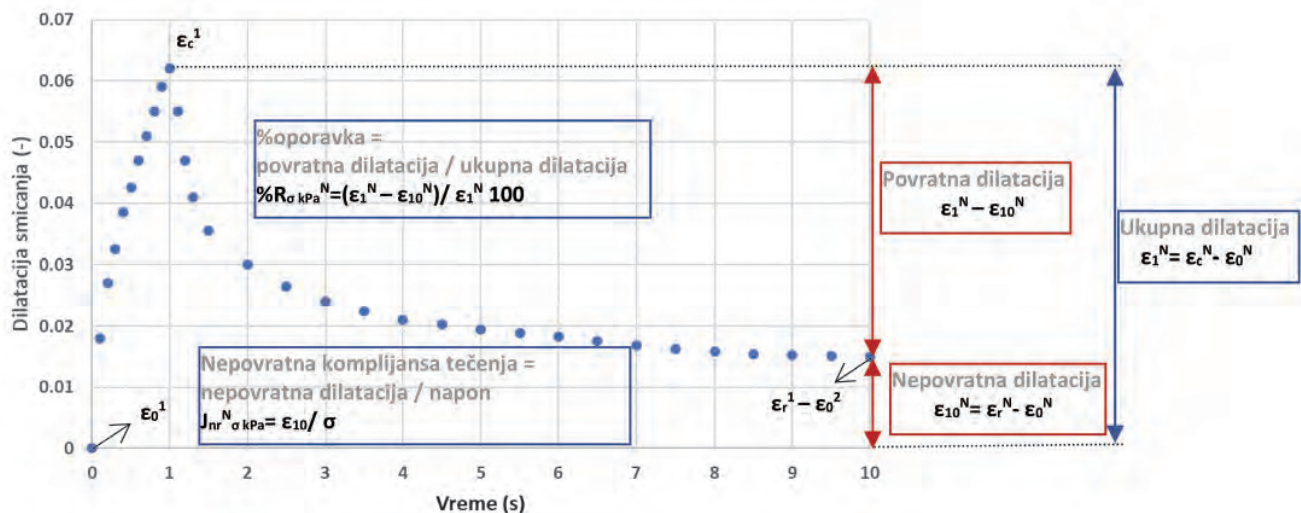
U okviru ovog opita bitumen je izložen ciklusima oscilacionog opterećenja sa frekvencijom 10 rad/s na temperaturi ispitivanja koja odgovara zahtevanoj visokoj temperaturi za bitumen prema PG specifikacijama. Tokom prvih 10 ciklusa opterećenja i rasterećenja uzorak se prvo opterećuje naponom smicanja od 0,1 kPa u trajanju od jedne sekunde, a zatim se dozvoljava oporavak uzorka u trajanju od devet sekundi. Nakon toga se na uzorak aplicira 10 novih ciklusa sa naponom smicanja od 3,2 kPa (slika 7).

Kao rezultat opita MSCR dobijaju se dve vrednosti:

- $J_{nr,3.2}$  - Prosečna vrednost nepovratne komplijanse tečenja (*Non-recoverable creep compliance*) nakon 10 ciklusa opterećenja pod naponom tečenja od 3,2 kPa;
- %R - Prosečna vrednost oporavka pri naponu od 3,2 kPa (MSCR Recovery).

Ove vrednosti se daju kao prosečne vrednosti za 10 ciklusa opterećenja i rasterećenja za svaki nivo napona. Parametri opita su ilustrovani na slici 8.

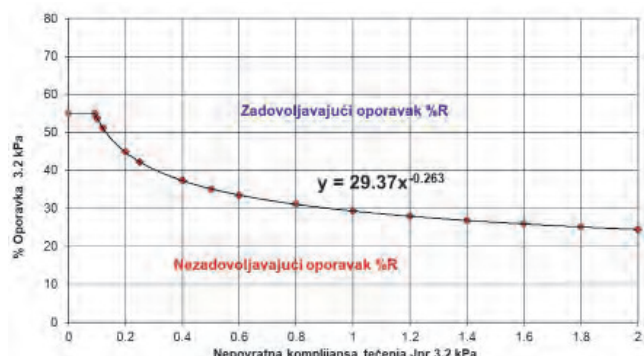
Rezultati opita MSCR su validirani upoređenjem sa ponašanjem izvedenih kolovoznih konstrukcija na poligonima za ubrzano opterećivanje kolovoza, kao i drugim opitnim deonicama. Parametri MSCR opita su pokazali bolje slaganje sa trajnom deformacijom kolovoza nego parametar  $G^*/\sin \delta$  za niz različitih tipova bitumena ispitivanih na 64°C.



Slika 8. Parametri opita MSCR [4]



Na slici 9 je prikazana primena parametra %R za definisanje stepena modifikacije bitumena. Pri tome treba imati u vidu da se za male vrednosti komplijanse tečenja  $J_{nr}$  primenjuje granica procentualnog oporavka od 55%.



Slika 9. Primena %R za definisanje modifikacije bitumena

U tabeli 3 su prikazane modifikovane PG specifikacije za visoke temperature koje uzimaju u obzir nepovratnu komplijansu tečenja  $J_{nr3.2}$  u skladu sa standardom AASHTO M332-14. Ove modifikovane *Superpave* specifikacije se primenjuju približno u polovini država u SAD.

Tabela 3. Modifikovane PG specifikacije za visoke temperature

Nivo saobraćajnog opterećenja	Opis	Maksimum $J_{nr3.2}$
Standardni (S)	Manje od 10 miliona standardnih osovina i brzina saobraćaja veća od 70 km/h	4,5
Težak (H)	10-30 miliona standardnih osovina i brzina saobraćajnog toka 20-70 km/h	2,0
Vrlo težak (VH)	Više od 30 miliona standardnih osovina i brzina saobraćajnog toka manja od 20 km/h	1,5
Ekstremni (E)	Isto kao i za vrlo težak saobraćaj, u zonama naplatnih rampi i pristupa lučnim terminalima	0,5

### Brzi opit za karakterizaciju bitumena (Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahren - BTSV)

BTSV opit je razvijen i uveden u specifikacije u Nemačkoj kao jedna od metoda koja se može koristiti umesto konvencionalnih metoda za karakterizaciju ponašanja bitumena na visokim temperaturama (npr. metode prstena i kuglice). U okviru razvoja ove metode je princip određivanja  $T_{PK}$  primenjen za ispitivanje na reometru za dinamičko smicanje - DSR.

Upoređenje vrednosti kompleksnog modula smicanja i  $T_{PK}$  po metodi prstena i kuglice pokazalo je da se za obične putne bitumene može utvrditi okvirna prosečna vrednost kompleksnog modula smicanja od  $G^*=15$  kPa, dok za modifikovane

bitumene modul smicanja značajno varira, što ukazuje da se  $T_{PK}$  ne može koristiti za karakterizaciju polimer modifikovanih bitumena (slika 10).



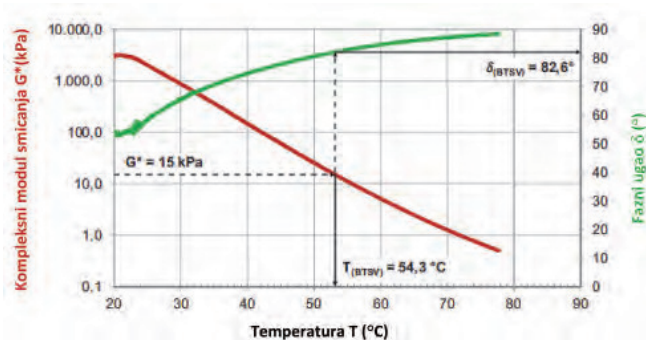
Slika 10. Kompleksni modul smicanja određen na temperaturi  $T_{PK}$  sa frekvencijom 10 rad/s [5]

Na bazi pretpostavke da na  $T_{PK}$  bitumen ima kompleksni modul krutosti od  $G^*=15$  kPa, razvijena je metodologija za određivanje karakteristika bitumena na visokim temperaturama primenom reometra za dinamičko smicanje sa prečnikom uzorka od 25 mm i debljinom od 1 mm. Slično kao i kod određivanja  $T_{PK}$ , temperatura ispitivanja u DSR-u se konstantno povećava od 20°C do 90°C, sa brzinom promene temperature od  $\Delta T=1,2^\circ\text{C}/\text{min}$ , tako da je vreme ispitivanja približno 60 min. Tokom povećanja temperature, na uzorak se nanosi konstantni oscilatorni napon smicanja od 500 Pa u modu kontrolisanog napona, sa frekvencijom od 10 rad/s. Kako se ispitivanje odvija u modu kontrolisanog napona, sa relativno malim naponom smicanja od 500 Pa, materijal ostaje u domenu linearne viskoelastičnosti. Tokom opita kompleksni modul smicanja  $G^*$  i fazni ugao se registruju svakih 2,5 s.

Na osnovu ispitivanja određuju se dva parametra:

- Temperatura  $T_{BTSV}$  koja predstavlja gornju granicu elasto-plastičnog ponašanja bitumena, slično kao i  $T_{PK}$ , samo što se u ovom slučaju radi o reološkom parametru, i
- Fazni ugao  $\delta_{BTSV}$  koji daje informaciju o odnosu elastične i viskozne komponente deformacije i na taj način, o stepenu modifikacije bitumena. Autori metode su predložili tri nivoa za klasifikaciju modifikacije u zavisnosti od faznog ugla: nemodifikovan bitumen ( $\delta_{BTSV} > 75^\circ$ ), modifikovan bitumen ( $65^\circ < \delta_{BTSV} < 75^\circ$ ) i visoko modifikovan bitumen ( $\delta_{BTSV} < 65^\circ$ ).

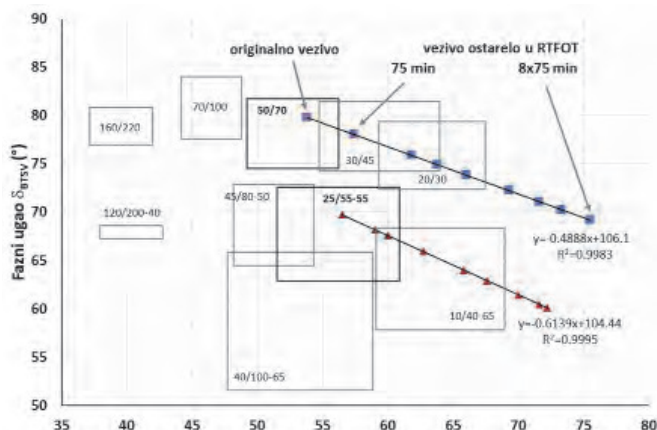
Primer određivanja  $T_{BTSV}$  i  $\delta_{BTSV}$  za uzorak bitumena B50/70 je prikazan na slici 11.



Slika 11. Primer određivanja kompleksnog modula smicanja i faznog ugla za B50/70 [5]

BTSV opit se može primeniti za definisanje karakteristika veziva na visokim temperaturama, kao i za utvrđivanje

postojanja ili nepostojanja modifikacije bitumena. Dva ključna parametra opita se takođe mogu koristiti za analizu stepena ostarelosti bitumena i njegove podložnosti starenju. Ova dva parametra se linearno menjaju sa starenjem (slika 12), kao i sa umešavanjem dva različita veziva, pa se stoga mogu koristiti i za utvrđivanje efikasnosti primene osveživača i na osnovu njih se može utvrditi neophodna količina osveživača kako bi se postigle ciljane reološke karakteristike osveženog veziva u domenu visokih temperatura.



Slika 12. Klasifikacija bitumena na bazi parametara  $T_{BTSV}$  i  $\delta_{BTSV}$  i njihova linearna promena sa starenjem za B50/70 i PmB 25/55-55 [5]

## Razvoj novih evropskih tehničkih uslova za polimer modifikovani bitumen

U okviru Evropskog komiteta za standardizaciju i odgovarajućeg komiteta za bitumen i veziva na bazi bitumena TC336, u toku je razvoj novog standarda za specifikacije polimer modifikovanog bitumena EN 14023. U okviru ovog poglavlja biće dat pregled novouvedenih ispitivanja u skladu sa trenutno važećim predlogom.

Ključne izmene ovih specifikacija odnose se upravo na uvođenje ispitivanja reoloških karakteristika polimer modifikovanih bitumena, koje se u značajnoj meri zasnivaju na metodologiji *Superpave*, kao i na metodama MSCR i BTSV, koje omogućavaju bolje sagledavanje visko-elastičnih karakteristika modifikovanog bitumena.

Za karakterizaciju visko-elastičnog ponašanja bitumena vrši se ispitivanje kompleksnog modula smicanja  $G^*$  i faznog ugla  $\delta$  na reometru za dinamičko smicanje (DSR - *Dynamic Shear Rheometer*) primenom standarda EN 14770. Pri tome je cilj da se odredi set temperatura na kojima bitumen ima određeni kompleksni modul smicanja i fazni ugao, i to:

- temperatura na kojoj bitumen ima  $G^*=15$  kPa, koja se odnosi na visoke eksploatacione temperature pri kojima bitumen ima malu krutost i
- temperatura na kojoj bitumen ima  $G^*=5$  MPa, koja se odnosi na srednje eksploatacione temperature.

Za svaki stepen starenja bitumena, ove dve temperature omogućavaju određivanje temperature osetljivosti bitumena i mogu se

koristiti za definisanje visko-elastičnih i viskoznih karakteristika bitumena.

U tom smislu potrebno je odrediti pet karakterističnih temperatura:

- za originalno, neostarelo vezivo: temperatura  $T_0$ , pri kojoj je  $G^*=15$  kPa i  $\delta(T_0)$ , na uzorku prečnika 25 mm;
- za kratkotrajno ostarelo vezivo (u skladu sa EN 12607-1) temperatura  $T_1$ , pri kojoj je  $G^*=5$  MPa i  $\delta(T_1)$ , na uzorku prečnika 8 mm,
- za dugotrajno ostarelo vezivo (u skladu sa EN 14769); temperatura  $T_3$ , pri kojoj je  $G^*=5$  MPa i  $\delta(T_3)$ , na uzorku prečnika 8 mm;
- temperatura  $T_4$ , pri kojoj je  $G^*=15$  kPa i  $\delta(T_4)$ , na uzorku prečnika 25 mm.

Nivoi krutosti od 15 kPa i 5 MPa su izabrani kao reprezentativni za određene uslove ispitivanja, ali i imajući u vidu mogućnosti opreme za ispitivanje.

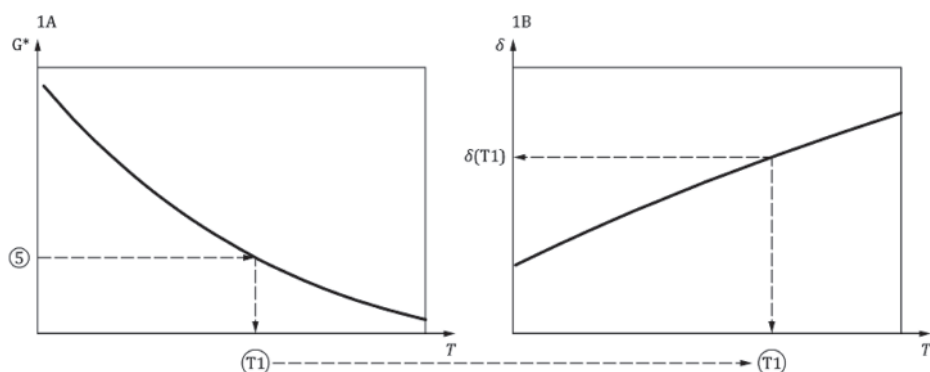
Temperature  $T_0$ - $T_4$  se određuju ispitivanjem pod cikličnim smičućim opterećenjem na nizu temperatura i pri frekvenciji od 1,59 Hz (10 rad/s). Kao rezultat, dobija se zavisnost modula krutosti i faznog ugla od temperature (slika 13), koja se koristi za određivanje svih reprezentativnih temperatura  $T_0$ - $T_4$ .

U okviru predloga novih specifikacija uveden je i zahtev za ispitivanje kratkotrajno ostarelog veziva u skladu sa MSCR opitom, prema standardu EN 16659 na temperaturi od 60°C (za modifikovane bitumene za koje nije moguće ispitivanje na ovoj temperaturi može se odrediti druga temperatura). Na bazi ispitivanja potrebno je odrediti dva parametra:

- procenat oporavka (%R) i
- nepovratno komplijansu tečenja  $J_{nr}$ .

Oba parametra se odnose na otpornost na trajnu deformaciju na visokim temperaturama, pri čemu je kritično ispitivanje kratkotrajno ostarelog veziva, što je reprezentativno za početnu fazu eksploatacije kolovoza kada je krutost veziva najmanja, a podložnost nastanku kolotruga najveća.

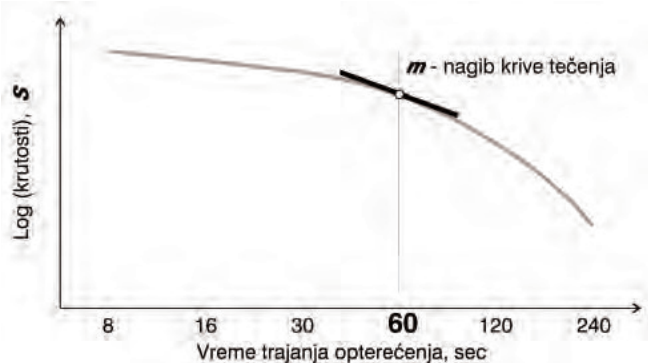
U pogledu otpornosti na niske temperature, postojećom verzijom standarda SRPS EN 14023 definisano je ispitivanje po metodi Fraass-a, u skladu sa standardom EN 12593. U predlogu nove verzije specifikacija, ispitivanje otpornosti na niske temperature se obavlja u skladu sa standardom EN 14771 na dugotrajno ostarelom vezivu na gredicama od bitumena opterećenim na savijanje i suštinski je identično opitu



Slika 13. Postupak određivanja temperatura  $T_0$ - $T_4$  na osnovu vrednosti kompleksnog modula smicanja  $G^*$  (1A) i procena faznog ugla  $\delta$  pri  $T_0$ - $T_4$  (1B) - primer za  $T_1$  i  $\delta(T_1)$  [6]

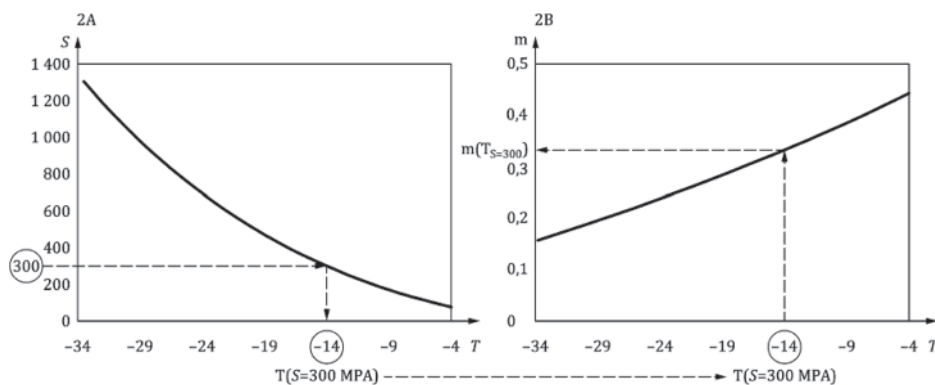
koji se obavlja u metodi *Superpave* na reometru za savijanje gredica (*Bending Beam Rheometer* - BBR). Specifikacijama se zahteva da se deklariše temperatura u rasponu od  $-27^{\circ}\text{C}$  do  $-3^{\circ}\text{C}$  pri kojoj bitumen ima krutost od  $S=300$  MPa, kao i nagib krive tečenja ( $m$ ) pri toj temperaturi.

U metodi *Superpave* propisane su maksimalna vrednost za krutost  $S$  (nakon 60 s opterećenja) od 300 MPa i minimalna vrednost nagiba krive krutosti  $m$  (60 s) = 0,3. Standardom EN 14771 se slično kao i u metodi *Superpave*, zahteva određivanje vrednosti za krutost i nagib krive tečenja nakon 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s i 240 s, pri čemu se vrednosti nakon 60 s uzimaju kao reprezentativne.



Slika 14. Promena krutosti bitumena pri ispitivanju na reometru za savijanje gredica

Na osnovu ispitivanja na više temperatura određuje se zavisnost modula krutosti bitumena  $S$  pri niskim temperaturama i nagiba krive tečenja sa promenom temperature, na osnovu koje se interpolacijom određuju merodavni rezultati ispitivanja (slika 15).



Slika 15. Postupak određivanja temperature  $T$  ( $S=300$  MPa) na osnovu zavisnosti  $S(T)$  (2A) i nakon toga, određivanja vrednosti nagiba krive tečenja  $m$  na temperaturi  $T$  ( $S=300$  MPa) (2B) [6]



## Zaključak

U radu je prikazan razvoj specifikacija za bitumen u Evropi i SAD, od njihove prve verzije koja se zasnivala na empirijskim karakteristikama bitumena, do razvoja PG klasifikacije u okviru programa *Superpave*, koja je nadograđena MSCR opitom za karakterizaciju ponašanja bitumena na visokim temperaturama, i konačno, biće implementirana kroz nove tehničke specifikacije za bitumen koje će se primenjivati u Evropi. U ovom trenutku nisu propisane kriterijumske vrednosti, već se zahteva samo deklarisanje određenih parametara, što će u kasnijoj fazi razvoja standarda poslužiti i za definisanje kriterijuma.

Takođe je prikazan i opit BTSV koje je razvijen 2017. godine u Nemačkoj i koji se u dosadašnjoj praksi pokazao kao izuzetno uspešan za karakterizaciju bitumena na visokim temperaturama, pa su određeni elementi ove metode takođe uključeni u predlog specifikacija za polimer modifikovane bitumene.

Osnovni cilj razvoja ovih specifikacija je predviđanje ponašanja bitumena i asfaltnih mešavina u fazi eksploatacije u uslovima sve intenzivnijeg saobraćajnog opterećenja i znatno oštrijim uslovima sredine. ■

## LITERATURA:

1. The Asphalt Institute, The ASPHALT BINDER HANDBOOK MS-26 1st Edition, 2011.
2. SHRP-A-410: Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994.
3. Bahia, H., Anderson, D. The SHRP Binder Rheological Parameters: Why Are They Required and How Do They Compare to Conventional Properties. Rad saopšten na 74. godišnjoj konferenciji TRB-a, Washington D.C. 1995.
4. SRPS EN 16659:2017 Bitumen i bitumenska veziva - Ispitivanje oporavka veziva pri tečenju usled višestrukog opterećenja i rastećenja (MSCRT).
5. A. Alisov, C. Riccardi, J. Schrader, A.C. Falchetto & M.P. Wistuba (2018): A novel method to characterise asphalt binder at high temperature, Road Materials and Pavement Design.
6. prEN 14023:2020 - Bitumen and bituminous binders - Specification framework for polymer modified bitumens.