



# **Laporan Akhir Projek Penyelidikan Jangka Pendek**

## **Effect of Aggregate Shape on Asphalt Materials Properties**

**by**

**Assoc. Prof. Meor Othman Hamzah**

**Prof. Dr. Khairun Azizi Mohd. Azizli**

## KESAN BENTUK AGREGAT KE ATAS SIFAT BAHAN ASFALT ABSTRAK

Dalam industri pembinaan jalan raya yang semakin pesat membangun, permintaan ke atas agregat sebagai bahan binaan semakin meningkat. Sifat agregat memberi kesan yang signifikan ke atas ciri-ciri konkrit asfalt memandangkan hampir 90% campuran asfalt terdiri daripada agregat. Dalam kajian ini, agregat berkubik yang digunakan diproses melalui mesin penghancur batu ke batu (Barmac) manakala agregat ketaksekataan dihasilkan langsung daripada kuari. Matlamat kajian ini adalah merekabentuk campuran konkrit asfalt ACW14 menurut spesifikasi JKR dengan menggunakan agregat berkubik dan agregat ketaksekataan. Selain itu, mengkaji kesan pengusiaan terhadap sifat konkrit asfalt seperti modulus kebingkasan, rayapan dinamik dan kekuatan tegangan tak langsung. Dua jenis bahan pengikat telah digunakan iaitu bahan pengikat konvensional 80/100 dan bitumen terubahsuai *styrene butadiene styrene* (SBS). Berdasarkan sifat campuran yang diperolehi, semua campuran berbitumen yang menggunakan agregat berkubik memperlihatkan peningkatan sifat yang ketara berbanding campuran agregat ketaksekataan. Namun begitu, pengusiaan jangka pendek dan pengusiaan jangka panjang yang ditambahkan sinar ultra-ungu di dalam ketuhar juga menunjukkan peningkatan nilai modulus kebingkasan, rayapan dinamik dan kekuatan tegangan tak langsung berbanding campuran tak diusiakan. Keputusan juga menunjukkan bahawa nilai modulus kebingkasan dan kekukuhan rayapan menurun dengan meningkatnya suhu. Sebagai contoh, nilai modulus kebingkasan campuran bitumen 80/100 menurun di antara 60.7% hingga 73.0% manakala penurunan untuk campuran bitumen SBS ialah di antara 62.7% hingga 75.6% pada suhu 25°C ke 40°C. Analisis kajian juga menunjukkan bahawa bitumen terubahsuai lebih mampu merintang kesan negatif sebagai akibat suhu yang tinggi dan memperlihatkan potensi yang baik dalam merintang fenomena pengusiaan.

## EFFECT OF AGGREGATE SHAPE ON ASPHALT MATERIALS PROPERTIES ABSTRACT

Demand for aggregates as construction material increased due to the continuous development of the road building industry. Since aggregates made up of more than 90% of an asphalt mixture, aggregate properties significantly influence mix performance. Cubical aggregates used in this study were processed using the Barmac crusher compared to irregularly unevenly shaped aggregates produced from the quarries. The objective of this study was to design asphalt mixes complying with the JKR specifications for ACW14 using cubical and irregularly shaped aggregates. The effects of ageing on resilient modulus, dynamic creep and indirect tensile strength of both mixes were also studied. Two types of binder used in this study were a conventional 80/100 bitumen and a modified bitumen. From the mix properties, it was noticeable that mixes incorporating cubical aggregates exhibited improved performance compared to mixes incorporating irregularly shaped aggregates. Nevertheless, short term and long term ageing with ultra violet ray in a draft oven resulted in the increment of resilient modulus, dynamic creep and indirect tensile strength compared to un-aged mix specimens. These results also showed that the resilient modulus and dynamic creep value reduced as the temperature increased. For instance, the resilient modulus of mixes incorporating 80/100 bitumen decreased between 60.7% and 73.0% while the decrease for mixes incorporating SBS bitumen was between 62.7% and 75.6% when the test temperature increased from 25°C to 40°C. Analysis also showed that mixes incorporating modified bitumen were able to resist the adverse effects of high temperature and exhibited the potential to resist ageing.

## 1.0 PENGENALAN

Dalam pembinaan suatu jalan raya, struktur turapan direkabentuk untuk menanggung beban lalu lintas unjuran. Keupayaan struktur turapan untuk menanggung beban bukan hanya bergantung kepada ketebalan lapisan tetapi juga kepada kualiti bahan setiap lapisan tersebut. Namun begitu, kualiti bahan yang digunakan banyak mempengaruhi prestasi turapan di sepanjang hayat rekabentuknya. Penggunaan agregat yang berkualiti amat diperlukan di dalam pembuatan konkrit asphalt. Agregat yang berbentuk kubik akan memberikan kekuatan tambahan kepada konkrit asphalt kerana bentuknya yang tidak mudah patah apabila dikenakan daya mampatan secara berulang-ulang. Agregat berkubik juga perlu bagi partikel untuk menyusun rapat dalam mengisi ruang-ruang udara di dalam konkrit (Hudson, 1995). Bentuk agregat yang dihasilkan seperti berkubik, berkeping, memanjang dan ketaksekataan bergantung kepada faktor pemecahan dan jenis penghancur yang digunakan.

Penghancur Barmac merupakan jenis penghancur hentaman batu ke batu yang mampu menghasilkan agregat yang berkualiti tinggi. Oleh kerana itu, kajian ini bertumpu kepada penggunaan agregat berkubik hasil dari produk mesin Barmac yang kemudiannya digunakan dalam campuran konkrit asphalt jenis ACW14. Tujuan penggunaan agregat berkubik dalam campuran konkrit asphalt adalah untuk meningkatkan kebolehlenturan dan kestabilan turapan jalan raya. Di samping itu, kajian juga dijalankan agar ciri rekabentuk campuran yang diperolehi mematuhi spesifikasi JKR yang terkandung dalam SPJ 88 (JKR, 1988). Dengan itu, satu turapan dengan ciri kebolehlenturan yang tinggi diharapkan dapat terhasil dalam jangka hayat yang panjang dan berupaya menahan pembebanan kenderaan secara berulang-ulang.

## 2.0 OBJEKTIF

- i. Mengkaji dan menilai kesan agregat berkubik yang telah dihancurkan menggunakan mesin Barmac terhadap kekuatan konkrit asphalt berbanding agregat ketaksekataan.
- ii. Menentukan kandungan bitumen optimum konkrit asphalt jenis ACW14 yang menggabungkan agregat berkubik dan agregat ketaksekataan di dalam campuran bitumen SBS dan bitumen 80/100.
- iii. Menjalankan ujian lanjutan untuk menentukan prestasi campuran konkrit asphalt ACW14 daripada ujian modulus kebingkasan, ujian rayapan dinamik, dan ujian kekuatan tegangan tak langsung pada konkrit asphalt campuran agregat berkubik dan agregat ketaksekataan.
- iv. Mengkaji dan membandingkan kesan campuran konkrit asphalt ACW14 sebelum dan selepas pengusiaan dengan menjalankan ujian modulus kebingkasan, ujian rayapan dinamik dan ujian tegangan tak langsung.

## 3.0 KAJIAN LITERATUR

Pembinaan jalan raya merupakan sektor yang penting dalam ekonomi Malaysia dan bergantung tinggi kepada sektor agregatnya. Agregat terkenal sebagai "Cinderella" dalam dunia perlombongan dan sejak beberapa tahun ini telah membangun sebagai satu industri galian yang besar dalam dunia yang sedang pesat membangun (Smith dan Collis, 1993). Permintaan terhadap agregat untuk pembinaan jalan raya semakin meningkat. Ciri-ciri agregat sangat penting kepada kelakuan turapan konkrit asphalt dalam pembinaan jalan raya. Kandhal dan Mallick (1997) menyatakan bahawa kegagalan turapan seperti ubah bentuk kekal, perlucutan, penghancuran permukaan, dan rintangan geseran permukaan yang tidak mencukupi, boleh disebabkan oleh pemilihan dan penggunaan agregat yang tidak sesuai. Bantha et al. (2003) pula menyebut kekuatan dan ketahananlasakan turapan konkrit asphalt dipengaruhi oleh ciri-ciri bahan utamanya iaitu agregat.

Agregat berkualiti tinggi seperti yang berbentuk berkubik dan tekstur permukaan yang lebih baik telah dibuktikan sebagai suatu unsur yang penting dalam campuran konkrit asphalt. Chowdhury et al. (2001) melaporkan bahawa apabila beban dikenakan kepada agregat dalam campuran konkrit asphalt, maka permukaan kasar partikel agregat saling mengunci diantara satu sama lain dan berfungsi sebagai satu jisim utama dan elastik, dan seterusnya meningkatkan kekuatan ricih. Bentuk partikel campuran asphalt dan tekstur permukaan agregat adalah penting untuk mendapatkan pemadatan yang sempurna, meningkatkan rintangan beban ulangan dan kebolehkerjaan yang tinggi. Secara amnya, agregat berkubik dan bersudut dengan tekstur permukaan yang kasar adalah yang terbaik. Bitumen bertindak sebagai bahan pengikat yang melekatkan campuran bersama, tetapi agregat daripada isipadu pukal campuran membekalkan sebahagian besar daripada kekuatan sesuatu campuran.

Konkrit asphalt mengandungi kira-kira 95% mineral agregat daripada segi beratnya. Agregat mineral terdiri daripada kandungan agregat kasar yang tinggi. Kajian telah menunjukkan bahawa ciri-ciri agregat seperti saiz partikel, bentuk, dan tekstur mempengaruhi prestasi dan keupayaan perkhidmatan konkrit asphalt (Brown et al., 1989; Kandhal et al., 1992; Kim et al., 1992). Agregat yang leper dan memanjang cenderung untuk patah semasa proses pencampuran, pemadatan, dan dibawah beban lalulintas yang tinggi. Oleh itu, agregat berkubik adalah salah satu ciri penting yang mesti diambil kira dalam reka bentuk campuran konkrit asphalt untuk mengelakkan kegagalan turapan.

Banyak kajian telah menekankan peranan agregat berkubik dalam mengawal kelakuan campuran konkrit asphalt terutama sekali kelakuan rintangan terhadap peretakan lesu dan ubah bentuk kekal. Ubah bentuk kekal yang berlaku dalam turapan campuran berbitumen telah meningkat sebelum mencapai hayat reka bentuknya, manakala kajian menunjukkan bahawa campuran konkrit asphalt dipengaruhi oleh sifat agregat (Kalcheff dan Tunnicliff, 1982; Monismith, 1970; dan Kandhal dan Parker, 1998). Penyelidik-penyelidik ini telah menjalankan ujian yang memberi fokus pada pengaruh agregat halus, agregat kasar dan kesan gabungan agregat kasar dan halus ke atas campuran konkrit asphalt.

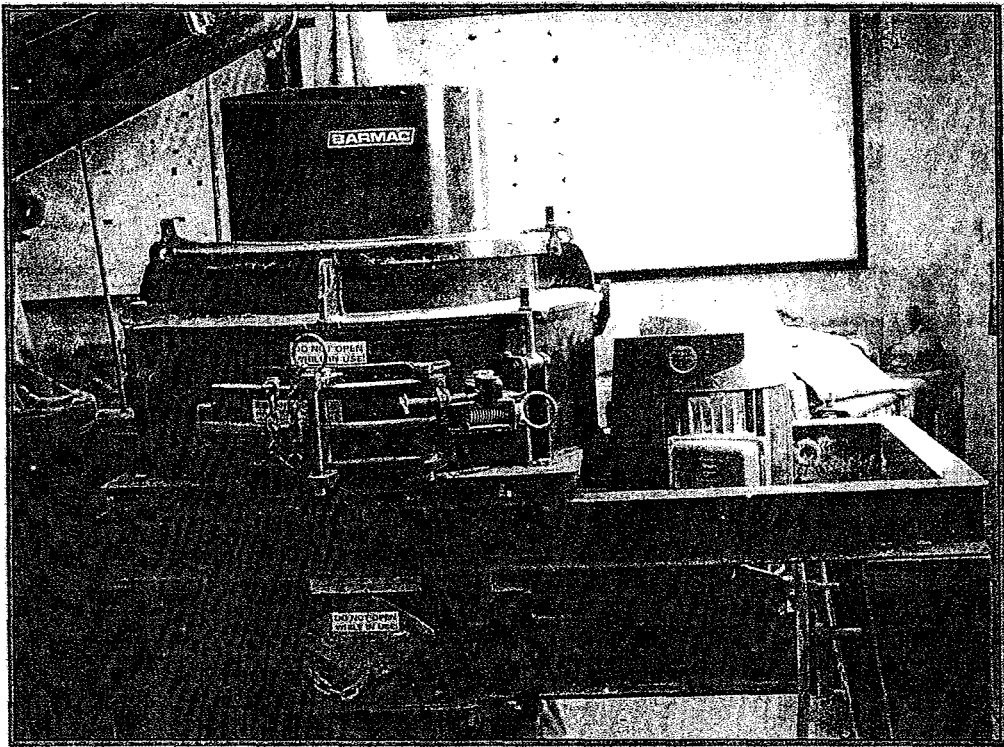
#### **4.0 CIRI BAHAN DAN METODOLOGI**

Bahan yang digunakan di dalam campuran asphalt ialah agregat, bitumen dan bahan pengisi. Penghancur hentaman aci menegak Barmac telah digunakan untuk menghasilkan agregat berbentuk kubik bagi menambah baik kualiti agregat yang sedia ada. Oleh yang demikian, pemilihan bahan-bahan yang sesuai perlu dilakukan berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan.

##### **4.1 Agregat**

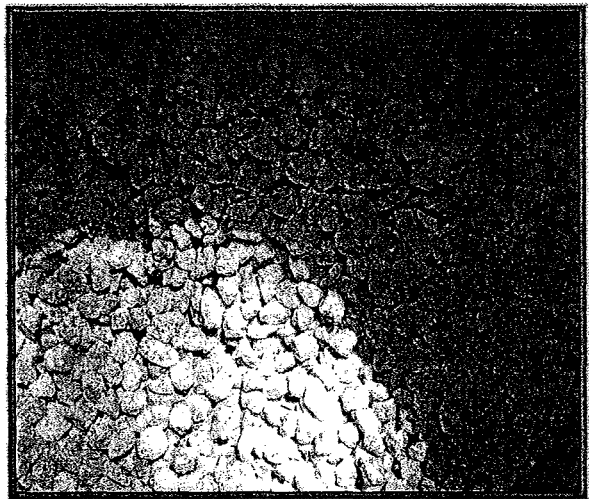
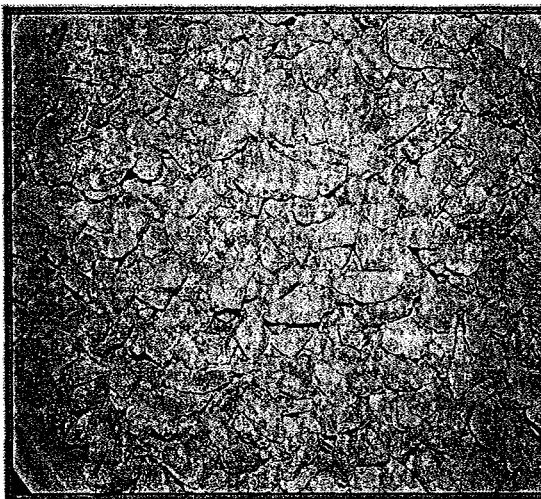
Agregat granit dibekalkan oleh YEN BUMI Sdn.Bhd. yang terletak di Bukit Mertajam, Pulau Pinang. Untuk menghasilkan bentuk agregat yang berkubik, mesin penghancur Barmac (Rajah 3.1) digunakan dalam kajian ini yang terdapat di Makmal Bahan dan Mineral, Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan dan Sumber Mineral, Universiti Sains Malaysia.

Ujian yang dijalankan ke atas agregat adalah Ujian Penggredan Agregat, Ujian Gravititi Tentu dan Penyerapan Air, Ujian Pecahan Agregat (ACV), Ujian Hentaman Agregat (AIV), Ujian Indeks Pemanjangan (EI) dan Ujian Indeks Kekepingan (FI).



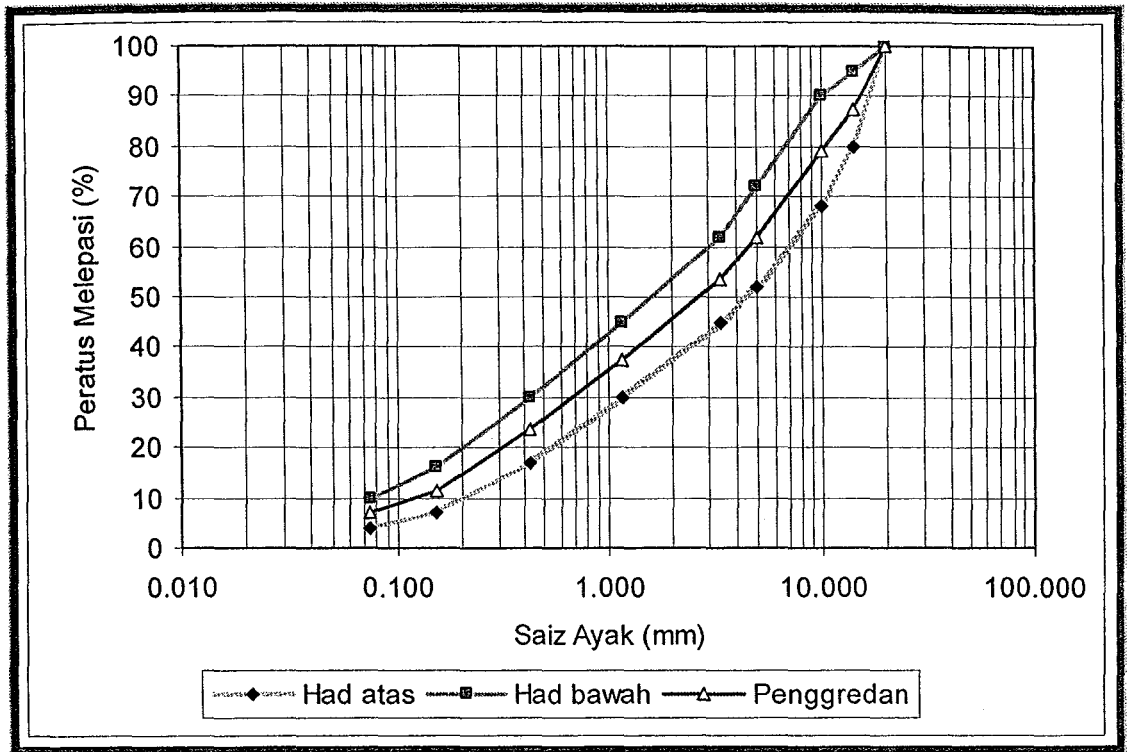
Rajah 3.1: Mesin Barmac RoR

Mekanisme penghasilan agregat berkubik berlaku apabila wujud perlanggaran di antara satu partikel agregat dengan partikel agregat lain dan juga hentaman agregat terhadap binaan lapisan batuan di bahagian dalam ruangan pemutar. Lapisan batuan akan terbina di dalam rotor dan kebuk penghancuran yang berperanan sebagai media penghancur sesama batuan. Terdapat empat jenis mekanisme pemecahan yang berlaku semasa operasi penghancuran dijalankan iaitu lelasan (*abrasion*), penghakisan geseran (*attrition*), hentaman (*shatter*) dan belahan (*cleavage*). Kesemua mekanisme tersebut berlaku di dalam penghancur Barmac sehingga menghasilkan satu produk agregat berkubik. Rajah 3.2 menunjukkan rupa bentuk agregat sebelum dan selepas dihancurkan menggunakan mesin penghancur Barmac.



Rajah 3.2: Agregat Kasar Sebelum dihancurkan dan Selepas dihancurkan

Penggredan agregat yang digunakan dalam kajian ini mematuhi penggredan agregat untuk jenis campuran ACW14 yang tercatat dalam spesifikasi JKR (JKR, 1988). Penggredan ini dipilih berdasarkan prestasinya yang baik, sesuai dan telah lama digunakan dalam pembinaan jalan raya di Malaysia. Rajah 3.3 menunjukkan liputan penggredan yang digunakan dalam kajian ini.



Rajah 3.3 : Penggredan agregat yang digunakan dalam kajian (JKR, 1988)

#### 4.2 Bitumen

Bitumen merupakan satu daripada unsur penting dalam merekabentuk campuran. Sifat bitumen mempengaruhi kekuatan, berat unit, kandungan rongga udara dan ketahanan lasakan campuran asfalt. Ujian yang dijalankan ke atas bitumen adalah Ujian Penusukan Piawai, Ujian Titik Lembut dan Ujian Kemuluran. Ujian dilakukan menurut tatacara piawai AASHTO (AASHTO, 2002).

Jadual 3.1: Kaedah Ujian Terhadap Bitumen Konvensional 80/100 dan Bitumen Terpinda SBS

Jenis Bitumen	Penamaan Ujiaan	Kaedah Ujikaji
Konvensional 80/100 dan Terpinda SBS	Penusukan Piawai	AASHTO T49-97, 2002 (AASHTO, 2002a)
	Titik Lembut	AASHTO T53-96, 2002 (AASHTO, 2002b)
	Kemuluran	AASHTO T51-00, 2002 (AASHTO, 2002c)

## **5.0 PENYEDIAAN SPESIMEN DAN PERALATAN**

### **5.1 Pemilihan Agregat**

Agregat yang digunakan dalam kajian ini adalah agregat yang diayak mengikut julat saiz yang dikehendaki iaitu saiz 20-14 mm, 14-10 mm, 10-5 mm, 5-3.35 mm, 3.35-1.18 mm, 1.18-0.425 mm, 0.425-0.150 mm dan 0.150-0.075 mm. Agregat dikelompokkan secara berasingan mengikut berat yang ditetapkan iaitu 1200 g. Agregat yang digunakan ditimbang dan diletakkan ke dalam sebuah bekas. Agregat dan pengisi yang telah dihitung beratnya, dimasukkan ke dalam ketuhar bersama acuan keluli dan rod logam yang digunakan sepanjang proses penghasilan spesimen.

### **5.2 Penyediaan Bitumen**

Bitumen merupakan bahan pengikat yang berfungsi sebagai agen untuk melekatkan butiran agregat dengan bahan pengisi dalam campuran. Jenis bitumen yang digunakan dalam kajian ini ialah bitumen 80/100 dan bitumen SBS. Bitumen 80/100 dipanaskan dalam ketuhar pada suhu 140°C selama lebih kurang 2 jam, manakala bitumen SBS dipanaskan pada suhu 180°C selama sekurang-kurangnya 4 jam.

### **5.3 Pemadatan Spesimen Dengan Pemadat Marshall**

Pelantak dan acuan keluli dibersihkan dan dipanaskan mengikut suhu campuran. Agregat dan pengikat dibancuh dalam mesin pencampur. Acuan yang telah dipanaskan diletakkan di atas meja dan sehelai kertas turas berdiameter 101.6 mm dimasukkan ke dasar acuan. Kesemua campuran kelompok yang panas dimasukkan ke dalam acuan. Spesimen dicucuk sebanyak 15 kali di sekeliling dan 5 kali ditengah dengan menggunakan rod logam, bahagian atas campuran diratakan dan sehelai kertas turas diletakkan di atasnya. Setelah spesimen siap untuk dipadat, spesimen diletakkan di bawah tukul pemadat Marshall yang telah disetkan pada nilai hentaman sebanyak 75 kali setiap permukaan. Spesimen dibiarkan menyejuk semalaman sebelum disemperit untuk penentuan sifat geometri dan ujian lanjutan.

### **5.4 Ujian-Ujian Keatas Spesimen**

#### **5.4.1 Ujian Kestabilan dan Aliran**

Ujian kestabilan Marshall dijalankan menurut tatacara ASTM D6927-04, (ASTM, 2005a). Tujuan utama ujian Marshall dijalankan ialah untuk mendapatkan nilai kestabilan dan aliran yang merupakan di antara parameter yang digunakan untuk menentukan kandungan bitumen optimum campuran berbitumen.

#### **5.4.2 Penentuan Graviti Tentu Teori Maksimum Campuran**

Penentuan graviti tentu teori maksimum campuran dijalankan menurut kaedah AASHTO T-209-99. (AASHTO, 2002d).

#### **5.4.3 Ujian Modulus Kebingkas**

Ujian modulus kebingkas digunakan untuk mengukur modulus elastic campuran asphalt. Nilai modulus kebingkas sangat berkesan untuk meramal sifat kebolehlenturan spesimen. Spesimen konkrit asphalt yang mempunyai nilai modulus kebingkas yang rendah pada suhu yang rendah mempamerkan sifat kebolehlenturan baik kerana pemulihan terikan yang tinggi. Ujikaji ini dijalankan mengikut prosedur ASTM D4123 (ASTM, 2005b).

#### **5.4.4 Ujian Rayapan Dinamik**

Prosedur untuk menjalankan ujian rayapan dinamik adalah berdasarkan spesifikasi ASTM D4123 (ASTM, 2005b). Ujian rayapan dinamik dijalankan untuk mengkaji rintangan terhadap ubah bentuk apabila dikenakan beban berulang pada suhu yang tinggi. Ujian rayapan dinamik dilakukan dengan mengenakan denyutan yang berulang secara paksi ke atas spesimen. Dua suhu ujian diterima pakai iaitu 40°C dan 60°C.

#### 5.4.5 Ujian Kekuatan Tegangan Tak Langsung

Ujian kekuatan tegangan tak langsung (ITS) merupakan satu ujikaji yang dijalankan untuk menilai tegangan maksimum yang mampu ditanggung oleh spesimen sebelum ia gagal. Dalam keadaan sebenar, beban yang dikenakan merupakan beban lalu lintas oleh kenderaan ke atas permukaan jalan. Ujian kekuatan tegangan tak langsung dijalankan menurut kaedah yang terkandung dalam ASTM D4123 (ASTM, 2005b).

#### 5.4.6 Pengusuaian Jangka Masa Pendek

Pengusuaian jangka masa pendek merupakan satu prosedur makmal yang digunakan untuk mensimulasi kesan pengusuaian campuran asfalt panas dan penyerapan bahan pengikat yang berlaku semasa proses pencampuran agregat dan pra-pemadatan proses pembinaan. Kaedah pengusuaian jangka masa pendek yang telah digunakan di dalam kajian ini dilakukan berdasarkan kaedah AASHTO R30-02 (AASHTO, 2002e).

#### 5.4.7 Pengusuaian Jangka Masa Panjang

Pengusuaian jangka masa panjang digunakan untuk mensimulasi pengusuaian yang berlaku selepas kira-kira 10 tahun turapan tersebut berada dalam tempoh perkhidmatannya. Oleh itu, pengusuaian jangka masa panjang digunakan bagi mensimulasi ciri-ciri campuran semasa penghujung hayat turapan tersebut. Pengusuaian jangka masa panjang campuran adalah berterusan daripada pengusuaian jangka masa pendek bagi campuran yang disediakan di makmal.

### 6.0 REKA BENTUK CAMPURAN

Secara umumnya, keputusan ujian dikategorikan kepada tiga bahagian iaitu ujian terhadap agregat, ujian terhadap bitumen dan reka bentuk campuran. Keputusan ujian agregat, bitumen dan reka bentuk campuran menggambarkan sifat yang digunakan di dalam konkrit asfalt ACW14 dan juga untuk menilai pematuhan kepada Spesifikasi JKR (JKR, 1988).

#### 6.1 Graviti Tentu dan Penyerapan Air

Nilai graviti tentu membayangkan sifat isipadu campuran asfalt. Keputusan graviti tentu dan penyerapan air setiap julat saiz agregat menurut penggredan ACW14 untuk agregat ketaksekatan dan agregat berkubik masing-masing ditunjukkan dalam Jadual 5.1 dan Jadual 5.2.

Jadual 5.1: Keputusan Ujian Graviti Tentu dan Penyerapan Air Agregat Ketaksekatan

Saiz Agregat (mm)	Graviti tentu			Penyerapan air (%)
	Graviti tentu (Kering-Ketuhar)	Graviti tentu (SSD)	Graviti tentu ketara	
20 – 14	2.614	2.632	2.661	0.74
14 – 10	2.624	2.635	2.663	0.78
10 – 5	2.634	2.647	2.668	0.81
5 - 3.35	2.644	2.665	2.670	0.84
3.35 - 1.18	2.653	2.673	2.705	0.88
1.18 - 0.425	2.658	2.676	2.708	0.90
0.425 - 0.150	2.655	2.675	2.713	0.95
0.150 - 0.075	2.659	2.682	2.735	0.97

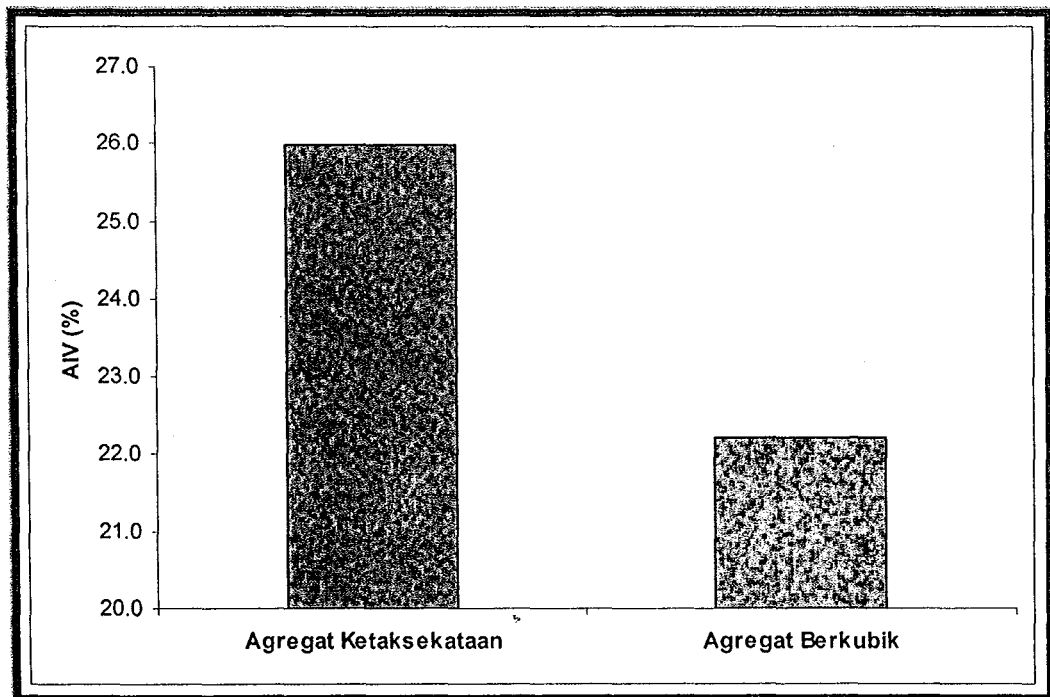


Jadual 5.2: Keputusan Ujian Graviti Tentu dan Penyerapan Air Agregat Berkubik

Saiz Agregat (mm)	Graviti tentu			Penyerapan air (%)
	Graviti tentu (Kering-Ketuhar)	Graviti tentu (SSD)	Graviti tentu ketara	
20 - 14	2.642	2.665	2.680	0.59
14 - 10	2.657	2.672	2.683	0.61
10 - 5	2.659	2.675	2.689	0.64
5 - 3.35	2.662	2.676	2.695	0.68
3.35 - 1.18	2.666	2.679	2.710	0.75
1.18 - 0.425	2.660	2.685	2.715	0.80
0.425 - 0.150	2.675	2.689	2.725	0.86
0.150 - 0.075	2.682	2.696	2.738	0.90

### 6.2 Nilai Hentaman Agregat

Nilai hentaman agregat (AIV) merupakan suatu ukuran relatif rintangan sesuatu agregat terhadap beban hentaman. Rajah 5.1 melakarkan keputusan nilai AIV agregat ketaksekataan dan agregat berkubik. Nilai AIV agregat ketaksekataan ialah 26.0% manakala agregat berkubik ialah 22.2%.

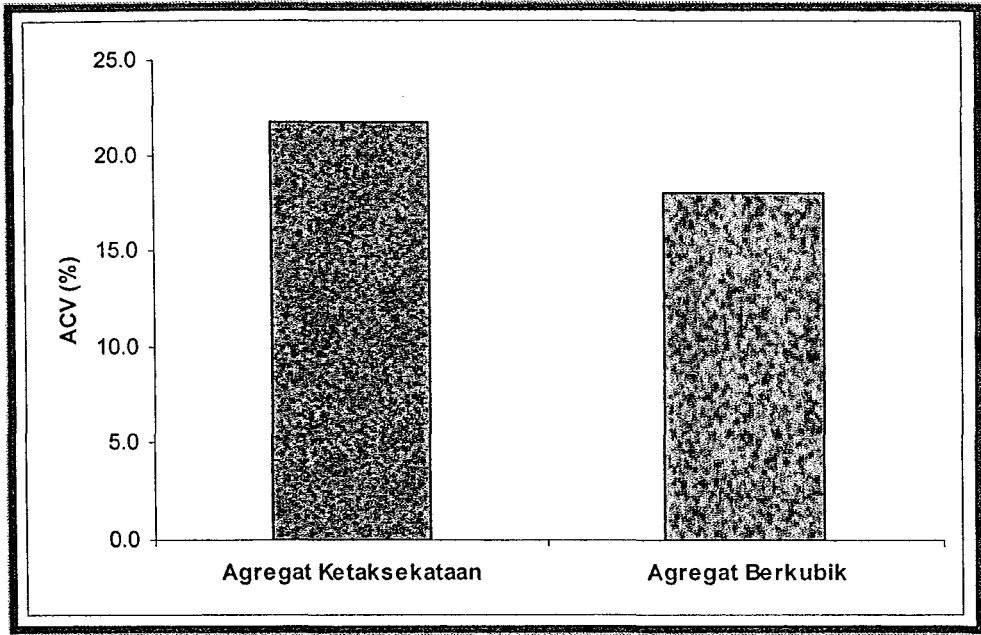


Rajah 5.1: Perbandingan Nilai AIV Agregat Ketaksekataan dan Agregat Berkubik

### 6.3 Nilai Pecahan Agregat

Nilai pecahan agregat (ACV) merupakan suatu ukuran ketahanan agregat terhadap penghancuran di bawah tindakan beban mampatan yang bertindak secara perlahan-lahan. Keputusan nilai ACV bagi agregat ketaksekataan dan agregat berkubik ditunjukkan dalam Rajah 5.2. Nilai ACV agregat berkubik dan agregat ketaksekataan masing-masing

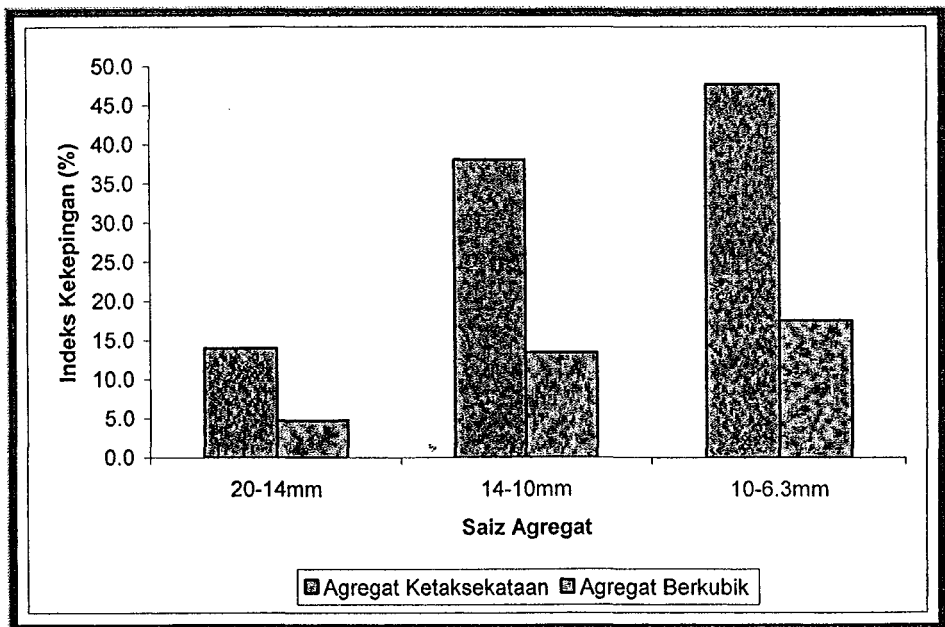
ialah 18.1% dan 21.8%. Nilai ACV agregat berkubik adalah 14.7% lebih rendah berbanding agregat ketaksekataan yang dihancurkan melalui mod mampatan.



Rajah 5.2: Perbandingan ACV Agregat Ketaksekataan dan Agregat Berkubik

### 6.3 Indeks Kekepingan

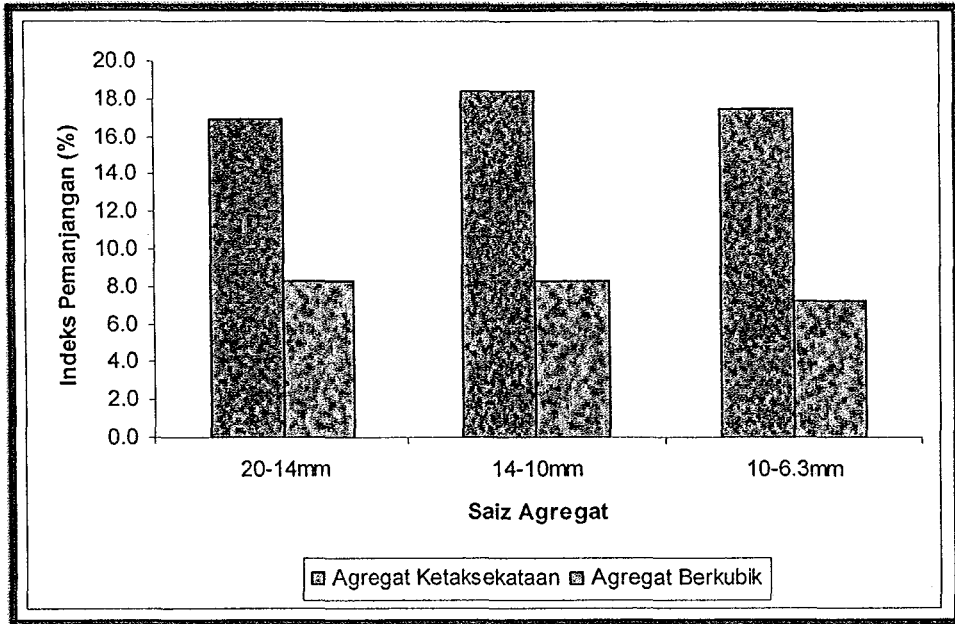
Keputusan indeks kekepingan agregat ditunjukkan di dalam Rajah 5.3. Nilai indeks kekepingan agregat berkubik adalah lebih rendah berbanding agregat ketaksekataan iaitu 7.9% berbanding 17.6%. Indeks kekepingan agregat ketaksekataan adalah lebih tinggi daripada indeks kekepingan agregat berkubik sebanyak 54.8%. Menurut Spesifikasi JKR (JKR, 1988), had tentuan nilai indeks kekepingan agregat ialah tidak melebihi 30%.



Rajah 5.3: Perbandingan Nilai Indeks Kekepingan Agregat Ketaksekataan dan Agregat Berkubik

#### 6.4 Indeks Pemanjangan

Daripada carta bar Rajah 5.4, agregat berkubik mempunyai nilai indeks pemanjangan yang lebih rendah dibandingkan agregat biasa. Misalnya, indeks pemanjangan agregat ketaksekataan pada pecahan saiz 20-14mm, 14-10mm dan 10-6.3mm masing-masing ialah 16.9%, 18.4% dan 17.5%. Walau bagaimanapun, indeks pemanjangan agregat berkubik yang setara adalah 8.3%, 8.3% dan 7.2% iaitu sebanyak 51.0%, 54.8% dan 58.6% lebih kecil daripada agregat ketaksekataan.



Rajah 5.4: Perbandingan Nilai Indeks Pemanjangan Agregat Ketaksekataan dan Agregat Berkubik

#### 6.5 Penusukan Piawai

Jadual 5.3 menunjukkan nilai penusukan bitumen 80/100 dan bitumen SBS masing-masing sebanyak 81 dmm dan 47 dmm. Nilai penusukan yang tinggi bermakna bitumen bersifat lebih lembut dan begitu juga sebaliknya.

Jadual 5.3: Keputusan Ujian Penusukan Piawai

Jenis Bitumen	Purata Penusukan (dmm)
80/100	81
SBS	47

#### 6.6 Titik Lembut Bitumen

Nilai titik lembut digunakan untuk menentukan ciri kerentanan suhu bahan bitumen. Keputusan purata titik lembut bitumen diberikan di dalam Jadual 5.4. Bitumen 80/100 mempunyai nilai titik lembut yang rendah berbanding bitumen SBS iaitu 46.5°C berbanding 97.5°C. Ini menunjukkan bahawa bitumen SBS mempunyai ketahanan terhadap suhu yang tinggi dan lebih sesuai digunakan sebagai bahan campuran konkrit asphalt.

Jadual 5.4: Keputusan Ujian Titik Lembut

Jenis Bitumen	Purata Titik Lembut ( $^{\circ}\text{C}$ )
80/100	46.5
SBS	97.5

### 6.7 Kemuluran Bitumen

Bahan yang mulur akan memanjang apabila dikenakan daya tegangan, manakala bahan yang rapuh pula akan patah apabila daya sedemikian dikenakan. Menurut Spesifikasi JKR (JKR, 1988), kemuluran bitumen pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$  bagi bitumen 80/100 hendaklah melebihi 100 sm. Daripada Jadual 5.5, kemuluran bitumen 80/100 dan bitumen SBS masing-masing ialah 156.3 sm dan 160.2 sm iaitu melebihi had yang ditetapkan oleh spesifikasi JKR (JKR, 1988).

Jadual 5.5: Keputusan Ujian Kemuluran

Jenis Bitumen	Purata Kemuluran (sm)
80/100	156.3
SBS	160.2

### 6.8 Ketumpatan Nisbi

Nilai ketumpatan nisbi diperolehi daripada Shell Ltd dan PPMS Sdn.Bhd. iaitu 1.02 dan 1.01 masing-masing bagi bitumen konvensional 80/100 dan bitumen terpinda SBS. Nilai ini menunjukkan bahawa bitumen konvensional 80/100 lebih tumpat daripada bitumen terpinda SBS. Jadual 5.6 turut merumuskan ciri bitumen 80/100 yang digunakan dalam menghasilkan spesimen untuk kajian ini.

Jadual 5.6: Ciri Bahan Pengikat 80/100 (JKR, 1988)

Ciri Bitumen	Konvensional 80/100
Ketumpatan Nisbi	1.02
Titik Lembut ( $^{\circ}\text{C}$ )	45-52
Penusukan Piawai Pada Suhu $25^{\circ}\text{C}$ (pen)	80-100
Kemuluran (cm) Pada Suhu $25^{\circ}\text{C}$	> 100

### 6.9 Penentuan Kandungan Bitumen Optimum

Kandungan bitumen optimum ditentukan menurut kaedah Marshall dengan mengikuti spesifikasi yang ditetapkan oleh JKR (JKR, 1988). Parameter yang digunakan dalam penentuan kandungan bitumen optimum adalah berasaskan nilai kestabilan, berat unit, aliran, lompong dalam campuran dan lompong dalam agregat galian. Walau

bagaimanapun, modulus kebingkasan telah ditambahkan untuk mensimulasikan prestasi campuran konkrit asphalt.

Tujuan utama reka bentuk campuran konkrit asphalt ACW14 ialah untuk mendapatkan nilai kandungan bitumen optimum. Nilai tersebut ialah jumlah kandungan bitumen yang mencukupi untuk menghasilkan segala ciri baik yang diharapkan daripada sesuatu campuran turapan. Sekiranya kandungan bitumen terlalu rendah, agregat tidak akan tersalut sepenuhnya, dan lompong udara akan meningkat ke aras yang berlebihan hingga menyebabkan ketahananlasakan menurun. Kandungan bitumen optimum untuk konkrit asphalt ACW14 ditentukan daripada kehubungan berikut:

- kestabilan lawan kandungan bitumen
- berat unit lawan kandungan bitumen
- aliran lawan kandungan bitumen
- lompong dalam campuran lawan kandungan bitumen
- lompong dalam agregat galian lawan kandungan bitumen
- modulus kebingkasan lawan kandungan bitumen.

Perincian nilai kandungan bitumen optimum ditunjukkan dalam Jadual 5.7 iaitu 5.0%, 4.8%, 5.0% dan 4.7% untuk campuran IK, CK, IS dan CS masing-masing.

Jadual 5.7: Kandungan Bitumen Optimum Konkrit Asphalt ACW14

Parameter	Kandungan Bitumen (%)			
	IK	CK	IS	CS
Kestabilan	4.9	4.7	4.8	4.6
Berat Unit	5.4	5.3	5.5	5.2
4% Lompong	5.0	4.8	4.5	4.3
Lompong Dalam Agregat	4.8	4.7	5.2	4.5
Modulus Kebingkasan	4.8	4.7	4.9	4.9
<b>Kandungan Bitumen Optimum (%)</b>	<b>5.0</b>	<b>4.8</b>	<b>5.0</b>	<b>4.7</b>

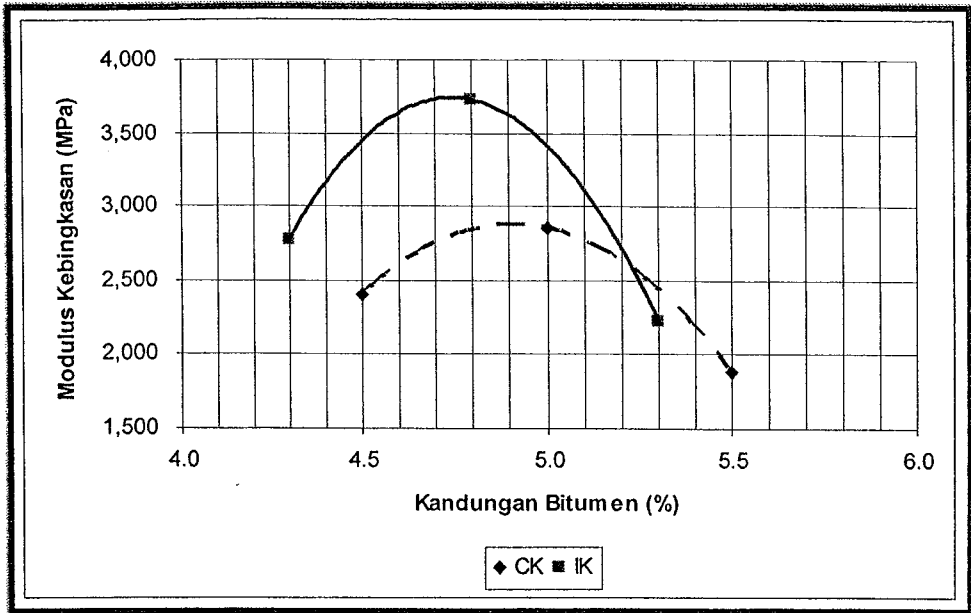
## 7.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Daripada hasil kajian, satu perbandingan antara ciri campuran bitumen lazim dengan campuran bitumen terubahsuai, campuran agregat berkubik dengan agregat ketaksekataan dan suhu kajian yang dipelbagaikan; dilakukan. Selain itu, kajian ini juga bertujuan menentukan kesan proses pengusiaan terhadap ciri kejuruteraan konkrit asphalt yang kemudiannya dibandingkan dengan keputusan kajian lain. Ujian yang telah dijalankan merangkumi ujian modulus kebingkasan, ujian rayapan dinamik, ujian kekuatan tegangan tak langsung, pengusiaan jangka pendek (STA) dan pengusiaan jangka panjang (LTA).

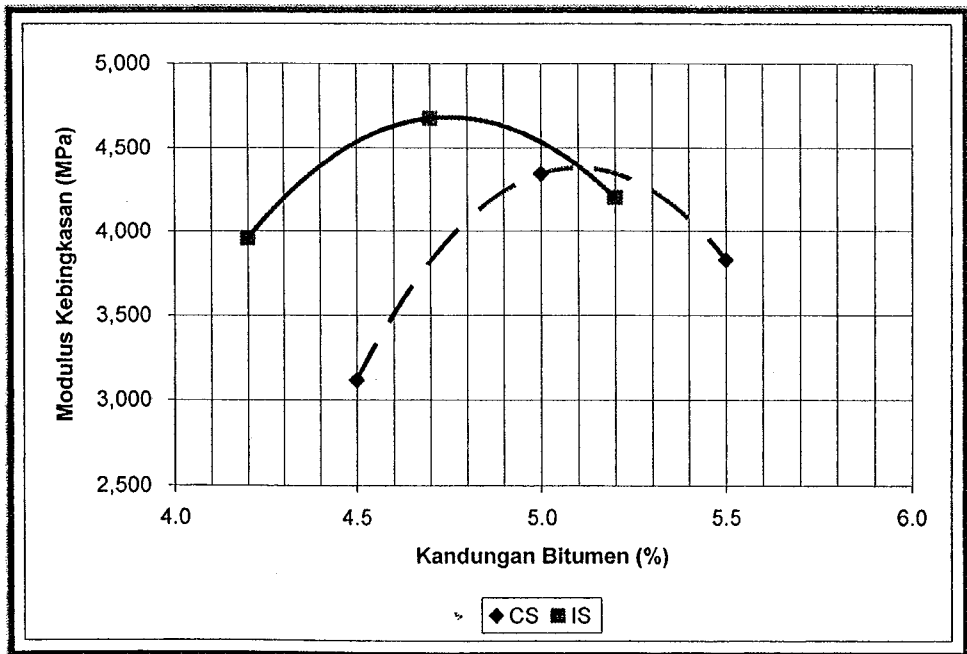
### 7.1 Modulus Kebingkasan

Modulus kebingkasan ialah penentuan nisbah antara tekanan yang diberikan dan terikan baikpulih yang berlaku setelah tekanan dikenakan pada masa tertentu. Keputusan

modulus kebingkasan konkrit asfalt campuran bitumen 80/100 dan bitumen SBS pada OBC $\pm$ 0.5% dilakarkan di dalam Rajah 6.1 dan Rajah 6.2. Modulus kebingkasan meningkat dengan pertambahan kandungan bitumen sehingga mencapai nilai maksimum dan mula menurun walaupun kandungan bitumen masih bertambah.



Rajah 6.1: Keputusan Ujian Modulus Kebingkasan Campuran Bitumen 80/100



Rajah 6.2: Keputusan Ujian Modulus Kebingkasan Campuran Bitumen SBS

## 7.2 Kesan Suhu

Keputusan ujian modulus kebingkasan pada suhu 25°C dan 40°C dipaparkan di dalam Jadual 6.1. Ternyata, modulus kebingkasan menurun dengan meningkatnya suhu. Keputusan juga menunjukkan pada suhu 25°C, penggunaan bitumen SBS dalam campuran konkrit asfalt mempamerkan nilai modulus yang lebih tinggi berbanding campuran bitumen 80/100. Namun begitu, pada suhu 40°C, nilai modulus bagi kedua-dua

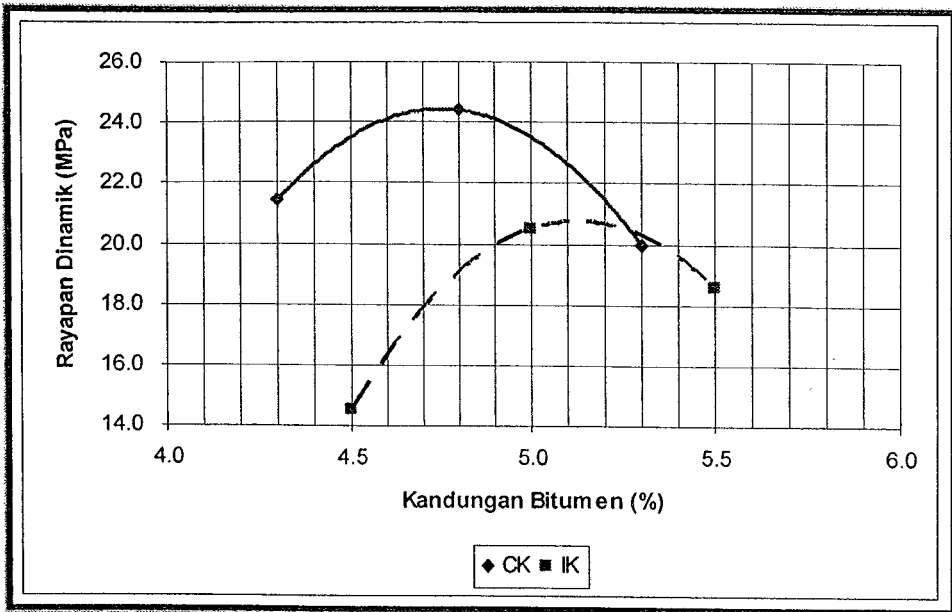
jenis campuran tersebut mula menurun iaitu antara 60.7% hingga 75.6%. Nilai modulus yang tinggi menunjukkan campuran yang dihasilkan berpotensi merintang ubah bentuk yang tinggi.

Jadual 6.1: Keputusan Ujian Modulus Kebingkasakan Pada Suhu 25°C dan 40°C

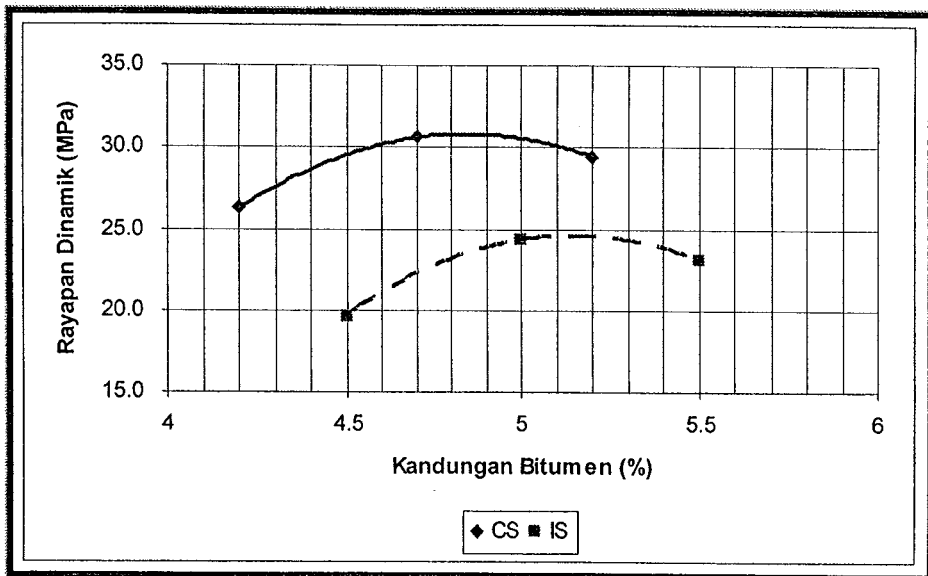
Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Kandungan Bitumen (%)	Modulus Kebingkasakan (MPa)		Penurunan (%)
			25°C	40°C	
80/100	IK	4.5	2,402	648	73.0
		5.0	2,857	1,123	60.7
		5.5	1,879	566	69.9
	CK	4.3	2,776	966	65.2
		4.8	3,729	1,352	63.7
		5.3	2,228	826	62.9
SBS	IS	4.5	3,116	1,164	62.7
		5.0	4,343	1,352	68.9
		5.5	3,827	934	75.6
	CS	4.2	3,957	1,358	65.7
		4.7	4,675	1,504	67.8
		5.2	4,200	1,184	71.8

### 7.3 Rayapan Dinamik

Keputusan ujian rayapan dinamik pada OBC  $\pm 0.5\%$  bagi campuran bitumen 80/100 dan campuran bitumen SBS dilakarkan di dalam Rajah 6.3 dan Rajah 6.4. Daripada lengkung yang terhasil, rayapan dinamik meningkat dengan meningkatnya kandungan bitumen dan mula menurun selepas titik maksimum dilalui walaupun kandungan bitumen masih bertambah. Keputusan yang diperolehi menunjukkan bahawa konkrit asphalt campuran CK dan CS meningkat lebih ketara jika dibandingkan dengan campuran IK dan IS. Hal ini membuktikan bahawa agregat berkubik di dalam campuran berperanan dalam menghasilkan konkrit asphalt yang bermutu tinggi jika dibandingkan dengan campuran agregat ketaksekataan.



Rajah 6.3: Keputusan Rayapan Dinamik Campuran Bitumen 80/100



Rajah 6.4: Keputusan Rayapan Dinamik Campuran Bitumen SBS

#### 7.4 Kesan Suhu

Kehubungan suhu dengan rayapan dinamik diberikan di dalam Jadual 6.2. Nilai rayapan menurun dengan meningkatnya suhu. Hasil kajian juga membuktikan bahawa, pada suhu tinggi, nilai kekukuhan rayapan menurun. Penurunan nilai yang paling ketara berlaku pada campuran berbitumen 80/100. Peratus menurunnya nisbah rayapan berjulat diantara 10.7% hingga 51.8% bagi kesemua jenis campuran. Walau bagaimanapun, konkrit asphalt campuran berbitumen SBS lebih berupaya dalam merintang masalah suhu tinggi berbanding campuran berbitumen lazim.

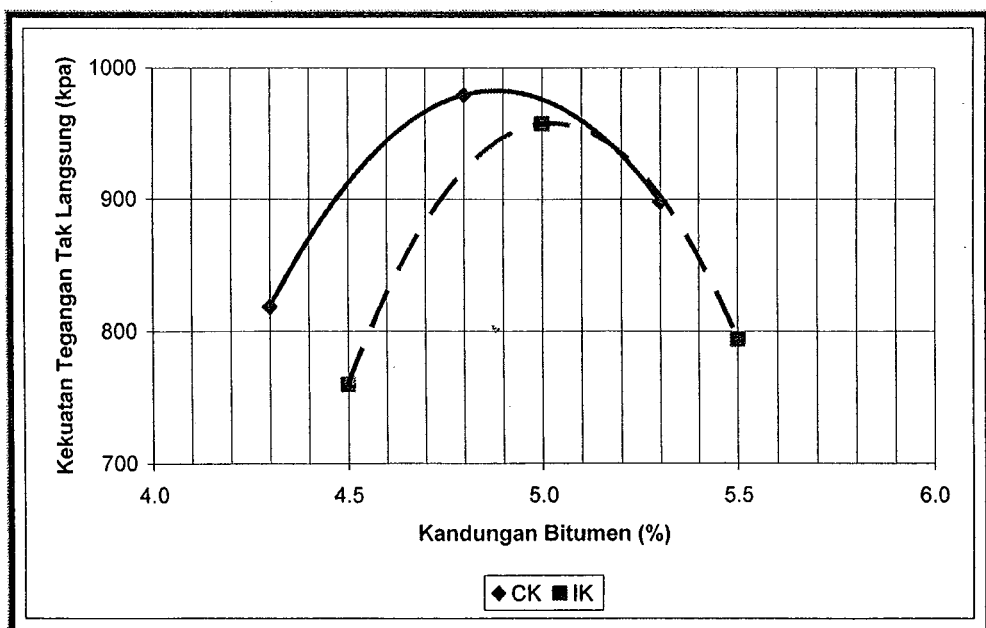


Jadual 6.2: Keputusan Ujian Rayapan Dinamik Pada Suhu 40°C dan 60°C

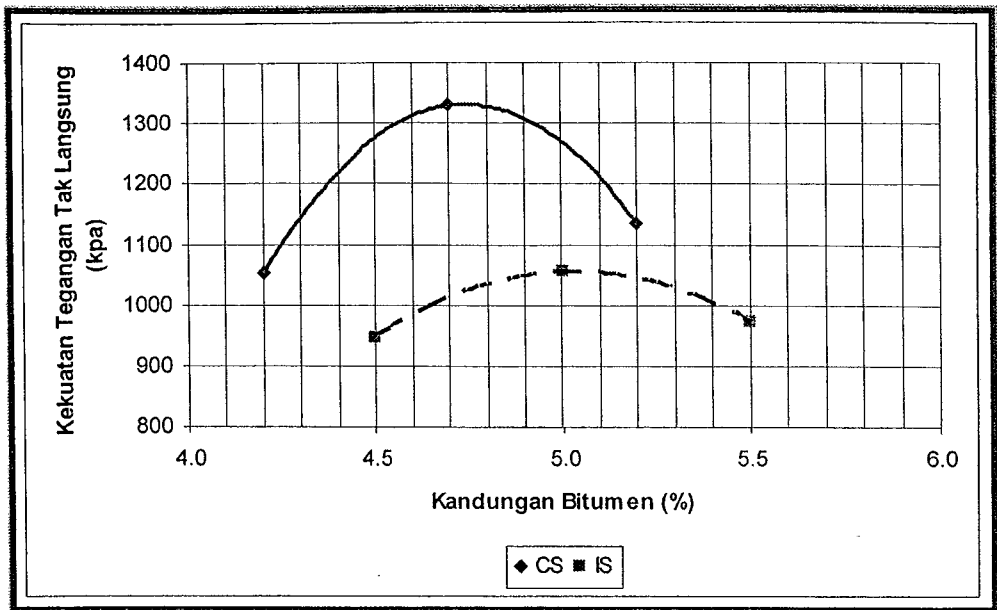
Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Kandungan Bitumen (%)	Rayapan Dinamik (MPa)		Penurunan (%)
			40°C	60°C	
80/100	IK	4.5	14.5	12.7	12.4
		5.0	20.5	17.7	13.7
		5.5	18.6	12.4	33.4
	CK	4.3	21.4	13.7	36.0
		4.8	24.4	21.8	10.7
		5.3	20.0	12.8	36.0
SBS	IS	4.5	19.6	15.2	22.4
		5.0	24.4	19.1	21.6
		5.5	23.1	12.7	45.0
	CS	4.2	26.3	15.9	39.4
		4.7	30.6	25.6	16.5
		5.2	29.5	14.2	51.8

### 7.5 Kekuatan Tegangan Tak Langsung

Keputusan ujian ITS pada  $OBC \pm 0.5\%$  bagi campuran bitumen 80/100 dan campuran bitumen SBS digambarkan di dalam Rajah 6.5 dan Rajah 6.6. Di dapati, kekuatan tegangan bertambah dengan penambahan kandungan bitumen, tetapi berkurang apabila kandungan bitumen melebihi nilai optimum. Nilai yang tinggi diperlukan bagi memastikan sesuatu turapan dapat menampung tegasan yang diakibatkan oleh beban kenderaan. Rajah 6.5 dan Rajah 6.6 juga memperlihatkan jenis lengkung berbentuk kuadratik bagi campuran CK dan CS berada diatas lengkung IK dan IS, hal ini menunjukkan bahawa konkrit asfalt campuran CK dan CS menghasilkan satu nilai tegangan yang tinggi berbanding campuran IK dan IS.



Rajah 6.5: Keputusan Kekuatan Tegangan Tak Langsung Campuran Bitumen 80/100



Rajah 6.6: Keputusan Kekuatan Tegangan Tak Langsung Campuran Bitumen SBS

## 7.6 Pengusuaian

### 7.6.1 Kesan Pengusuaian Jangka Pendek Terhadap Modulus Kebingkasan

Perbezaan suhu yang digunakan dalam kajian modulus kebingkasan dilakukan bagi mengenal pasti kesan yang ditimbulkan terhadap pengusuaian. Jadual 6.3 memberikan keputusan kajian modulus kebingkasan pada suhu 25°C dan 40°C. Secara umumnya, nilai modulus kebingkasan meningkat bagi kesemua jenis campuran selepas diusiaikan. Peningkatan yang direkodkan pada suhu 25°C berjudat diantara 13.0% hingga 15.4%, manakala pada suhu 40°C nisbah peningkatan dari tak diusia kepada pengusuaian ialah berkadar songsang iaitu antara 1.2% hingga 26.2%.

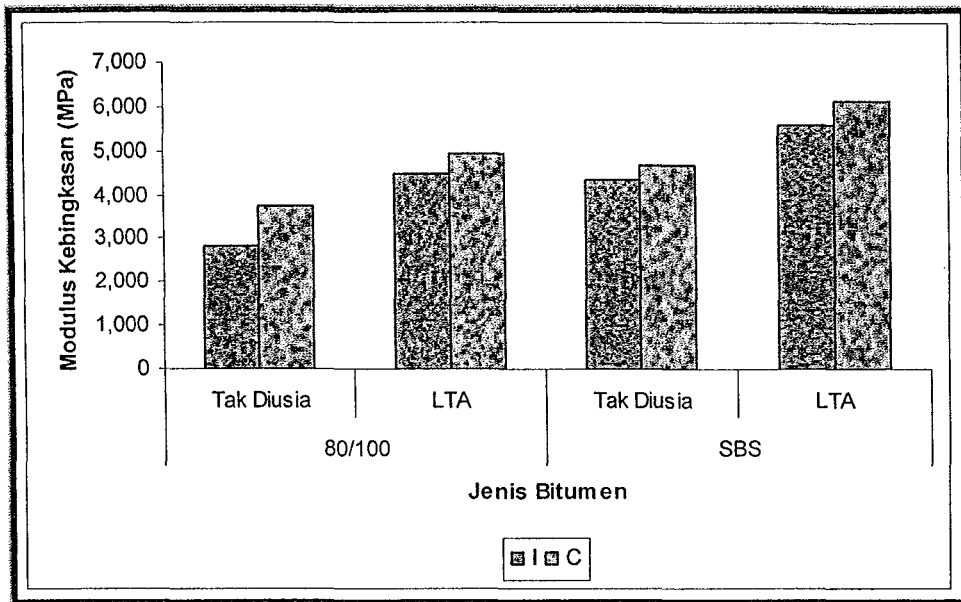
Jadual 6.3: Keputusan Ujian Modulus Kebingkasan Pada Suhu 25°C dan 40°C Setelah Pengusuaian Jangka Pendek

Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Modulus Kebingkasan (MPa)		Peningkatan (%)	Modulus Kebingkasan (MPa)		Peningkatan (%)
		25°C			40°C		
		Tak Diusia	STA		Tak Diusia	STA	
80/100	IK	2857	3229	13.0	1123	1267	12.8
	CK	3729	4304	15.4	1352	1368	1.2
SBS	IS	4343	4956	14.1	1352	1706	26.2
	CS	4675	5339	14.2	1504	1848	22.8

### 7.6.2 Kesan Pengusuaian Jangka Panjang Terhadap Modulus Kebingkasan

Daripada Rajah 6.7, nilai modulus kebingkasan yang diperolehi selepas simulasi pengusuaian jangka masa panjang dengan penambahan sinaran ultra-ungu dalam ketuhar udara teralir telah meningkat. Misalnya, pada suhu 25°C, peningkatan yang direkodkan

berjulat diantara 28.4% hingga 56.6% bagi semua jenis campuran. Pada suhu 40°C, nilai modulus kebingkasan meningkat sebanyak 15.9% hingga 36.9%. Hal ini menunjukkan pengerasan bahan pengikat dalam campuran telah bertambah akibat proses pengusiaan. Secara keseluruhannya, campuran CKL dan campuran CSL memberikan nilai modulus yang tinggi sebelum dan selepas diusiakan berbanding campuran IKL dan ISL.



Rajah 6.7: Keputusan Modulus Kebingkasan Pengusiaan Jangka Masa Panjang

### 7.6.3 Kesan Pengusiaan Jangka Pendek Terhadap Rayapan Dinamik

Secara keseluruhannya, nisbah rayapan menurun dengan meningkatnya suhu. Misalnya, suhu 40°C mencatatkan peratus peningkatan nilai kekukuhan rayapan selepas diusiakan iaitu 11.2% dan 13.1% masing-masing bagi campuran IKS dan CKS. Manakala campuran ISS dan CSS merekodkan nilai sebanyak 8.6% dan 9.1% masing-masing. Walau bagaimanapun, selepas suhu kajian ditingkatkan menjadi 60°C, nisbah rayapan yang diperolehi menunjukkan penurunan yang ketara seperti ditunjukkan di dalam Jadual 6.4.

Jadual 6.4: Keputusan Ujian Rayapan Dinamik Pada Suhu 25°C dan 40°C Setelah Pengusiaan Jangka Pendek

Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Rayapan Dinamik (MPa)		Peningkatan (%)	Rayapan Dinamik (MPa)		Peningkatan (%)
		40°C			60°C		
		Tak Dusia	STA		Tak Dusia	STA	
80/100	IK	20.5	22.8	11.2	17.7	18.7	5.7
	CK	24.4	27.6	13.1	21.8	24.3	11.5
SBS	IS	24.4	26.5	8.6	19.1	22.3	16.8
	CS	30.6	33.4	9.1	25.6	27.6	7.8

#### 7.6.4 Kesan Pengusiaan Jangka Panjang Terhadap Rayapan Dinamik

Pengusiaan jangka masa panjang digunakan untuk mensimulasi pengusiaan yang berlaku selepas 10 tahun turapan tersebut berada dalam tempoh perkhidmatannya. Nilai kekukuhan rayapan meningkat selepas pengusiaan. Peratusan peningkatan ini begitu ketara bagi semua jenis campuran. Ini dapat dibuktikan pada suhu 40°C, nilai rayapan dinamik meningkat diantara 14.7% sehingga 24.2% dan pada suhu 60°C, peratusan peningkatan adalah 16.8% hingga 25.2%. Nilai kekukuhan rayapan yang tinggi menunjukkan spesimen tersebut mampu merintang masalah yang diakibatkan oleh pengusiaan pada suhu 40°C dan 60°C.

Jadual 6.5: Keputusan Ujian Rayapan Dinamik Pengusiaan Jangka Panjang Pada Suhu 25°C dan 40°C

Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Rayapan Dinamik (MPa)		Peningkatan (%)	Rayapan Dinamik (MPa)		Peningkatan (%)
		40°C			60°C		
		Tak Diusia	LTA		Tak Diusia	LTA	
80/100	IK	20.5	24.9	21.5	17.7	21.7	22.6
	CK	24.4	30.3	24.2	21.8	27.3	25.2
SBS	IS	24.4	28.7	17.6	19.1	23.8	24.6
	CS	30.6	35.1	14.7	25.6	29.9	16.8

#### 7.6.5 Kesan Pengusiaan Jangka Pendek Melawan Pengusiaan Jangka Panjang

Gambaran yang lebih jelas berkaitan keputusan rayapan dinamik pengusiaan jangka pendek melawan pengusiaan jangka panjang dengan dedahan sinaran ultra-ungu dapat diperlihatkan di dalam Jadual 6.6. Secara amnya, nilai rayapan dinamik meningkat dengan peningkatan masa pengusiaan. Peningkatan yang diperolehi daripada kesemua jenis campuran pada suhu 40°C berjulat antara 5.1% hingga 9.8%. Pada suhu 60°C, peratus peningkatan yang dihasilkan dari semua jenis campuran adalah di antara 6.7% sehingga 16.0%. Analisis kajian juga memperlihatkan bahawa campuran berbitumen lazim mempunyai nilai kekukuhan rayapan terendah berbanding campuran bitumen terubahsuai. Namun begitu, campuran bitumen lazim mempamerkan nilai kekukuhan rayapan yang tinggi setelah pendedahan kepada pengusiaan jangka panjang dengan penambahan sinar ultra-ungu.

Jadual 6.7 memaparkan peratusan penurunan nilai kekukuhan rayapan dari suhu 40°C ke suhu 60°C bagi pengusiaan jangka pendek dan pengusiaan jangka panjang. Suhu yang tinggi boleh menurunkan nilai rayapan dinamik. Semakin tinggi suhu kajian, semakin rendah nilai kekukuhan rayapan dan begitulah sebaliknya. Nilai penurunan kekukuhan rayapan yang diperolehi berbeza-beza mengikut jenis campuran dan suhu yang diuji. Apabila spesimen diuji setelah diusiakan secara jangka pendek, nilai kekukuhan rayapan menurun 12.0% hingga 18.0% iaitu bagi semua jenis campuran. Namun begitu, peningkatan suhu daripada 40°C ke 60°C juga boleh menurunkan nilai rayapan dinamik walaupun telah melalui proses pengusiaan jangka panjang, penurunan yang diperlihatkan sebanyak 10.0% hingga 17.1%.

Jadual 6.6: Keputusan Ujian Rayapan Dinamik Pada Suhu 40°C dan 60°C Setelah Pengusuaian Jangka Pendek dan Jangka Panjang

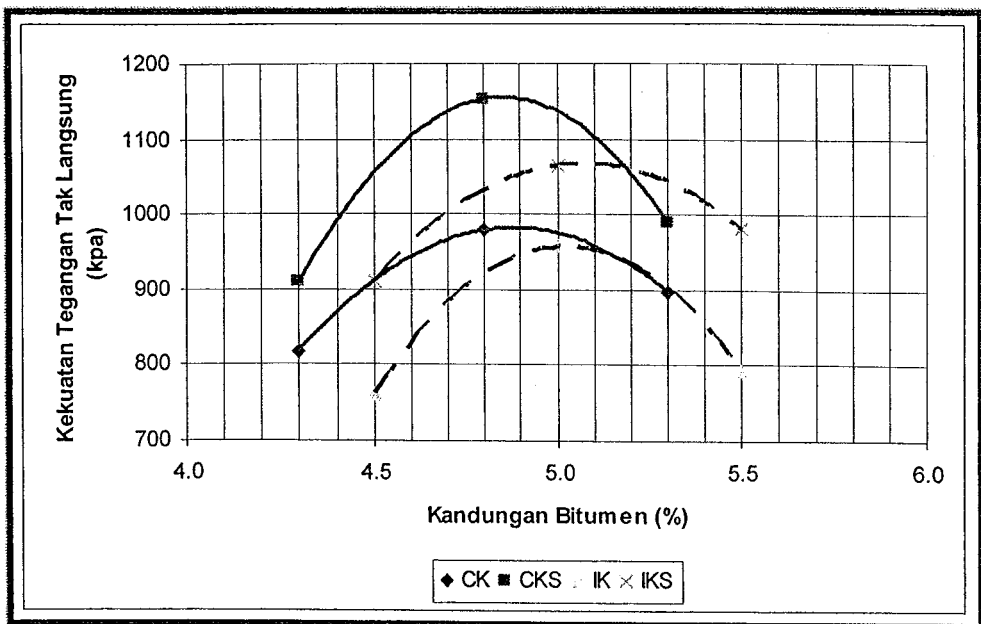
Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Rayapan Dinamik (MPa)		Peningkatan (%)	Rayapan Dinamik (MPa)		Peningkatan (%)
		40°C			60°C		
		STA	LTA		STA	LTA	
80/100	IK	22.8	24.9	9.2	18.7	21.7	16.0
	CK	27.6	30.3	9.8	24.3	27.3	12.3
SBS	IS	26.5	28.7	8.3	22.3	23.8	6.7
	CS	33.4	35.1	5.1	27.6	29.9	8.3

Jadual 6.7: Peratusan Penurunan Nilai Rayapan Dinamik Dari Suhu 40°C Ke suhu 60°C Setelah Pengusuaian Jangka Pendek dan Jangka Panjang

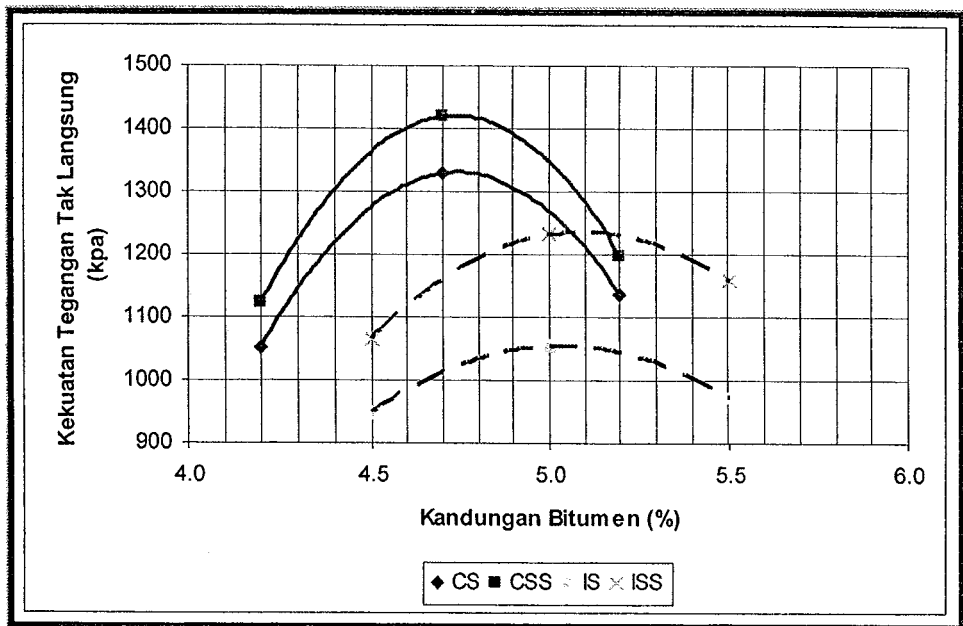
Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Rayapan Dinamik (MPa)		Penurunan (%)	Rayapan Dinamik (MPa)		Penurunan (%)
		STA			LTA		
		40°C	60°C		40°C	60°C	
80/100	IK	22.8	18.7	18.0	24.9	21.7	12.9
	CK	27.6	24.3	12.0	30.3	27.3	10.0
SBS	IS	26.5	22.3	15.9	28.7	23.8	17.1
	CS	33.4	27.6	17.4	35.1	29.9	14.8

### 7.6.6 Kesan Pengusuaian Jangka Pendek Terhadap Kekuatan Tegangan Tak Langsung

Keputusan ujian kekuatan tegangan menunjukkan bahawa nilai ITS meningkat dengan peningkatan kandungan bitumen sehingga mencapai titik maksimum dan mula menurun dengan peningkatan kandungan bitumen. Peningkatan yang dicatatkan berada antara julat 11.4% hingga 17.8% masing-masing bagi campuran IKS dan CKS. Walau bagaimanapun, campuran CKS dan CSS yang didedahkan kepada pengusuaian jangka pendek merekodkan peningkatan sebanyak 17.8% dan 6.8%.



Rajah 6.8: Keputusan Ujian Kekuatan Tegangan Tak Langsung Pengusiaaan Jangka Pendek Campuran Bitumen 80/100

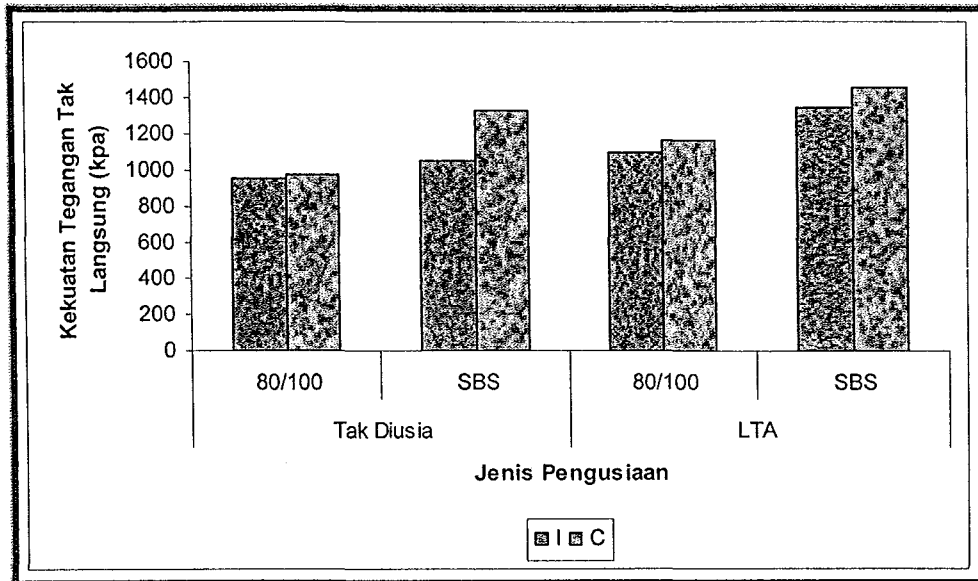


Rajah 6.9: Keputusan Ujian Kekuatan Tegangan Tak Langsung Pengusiaaan Jangka Pendek Campuran Bitumen SBS

### 7.6.7 Kesan Pengusiaaan Jangka Panjang Terhadap Kekuatan Tegangan Tak Langsung

Rajah 6.10 menunjukkan keputusan kekuatan tegangan tak langsung sebelum dan selepas pengusiaaan jangka panjang. Nilai ITS spesimen yang telah diusiaaan secara jangka panjang meningkat berbanding spesimen yang tak diusiaaan. Nilai ITS diukur bagi mengetahui potensi berlakunya keretakan spesimen yang diuji. Semakin tinggi nilai ITS maka semakin tinggi keupayaan spesimen untuk merintangai peningkatan rintangan peretakan. Keputusan juga mempamerkan campuran CKL dan CSL mempunyai nilai ITS yang lebih tinggi berbanding campuran IKL dan ISL walaupun bitumen lazim ditambahkan

ke dalam campuran. Misalnya, nilai ITS maksimum yang dicatatkan bagi campuran IKL tanpa proses pengusiaan ialah 957 KPa. Nilai ini meningkat sebanyak 15.4% iaitu selepas spesimen didedahkan kepada pengusiaan jangka panjang. Walau bagaimanapun, fenomena pengusiaan jangka panjang dengan simulasi sinaran ultra-ungu didalam ketuhar telah memberikan nilai ITS yang lebih tinggi terhadap campuran berbitumen SBS dan campuran bitumen lazim.



Rajah 6. 10: Keputusan Ujian Kekuatan Tegangan Tak Langsung Pengusiaan Jangka Panjang

### 7.6.8 Kesan Pengusiaan Jangka Pendek Melawan Pengusiaan Jangka Panjang

Perbandingan keputusan ujian ITS setelah pengusiaan jangka pendek dengan pengusiaan jangka panjang bagi campuran berbitumen SBS dan bitumen 80/100 ditunjukkan di dalam Jadual 6.8. Nilai ITS meningkat dengan meningkatnya masa pengusiaan. Semakin lama spesimen didedahkan kepada pengusiaan, semakin tinggi nilai yang diperolehi. Jadual tersebut juga memperlihatkan peratus peningkatan yang ketara bagi setiap jenis campuran. Sebagai contoh, spesimen IK menghasilkan nilai ITS sebanyak 1066 KPa iaitu setelah proses pengusiaan jangka pendek. Dengan jenis spesimen yang sama, nilai ITS meningkat kepada 1104 KPa apabila pengusiaan jangka panjang dilaluinya. Perbezaan nilai di antara keduanya ialah sebanyak 3.6%. Walau bagaimanapun, nilai ITS campuran bitumen SBS lebih tinggi dibanding campuran bitumen lazim. Peratus peningkatannya adalah 9.5% dan 2.6% masing-masing mewakili campuran IS dan campuran CS.

Jadual 6.8: Perbandingan Keputusan Ujian ITS  
Pengusuaian Jangka Pendek dengan Pengusuaian Jangka Panjang

Jenis Bitumen	Jenis Campuran	Kekuatan Tegangan Tak Langsung (MPa)		Peningkatan (%)
		STA	LTA	
80/100	IK	1,066	1,104	3.6
	CK	1,153	1,171	1.6
SBS	IS	1,231	1,348	9.5
	CS	1,419	1,456	2.6

## 8.0 KESIMPULAN

1. Ciri bitumen 80/100 yang digunakan memenuhi kehendak spesifikasi yang ditetapkan oleh JKR (JKR, 1988). Spesifikasi untuk bitumen terpinda, contohnya SBS, tidak dinyatakan dalam spesifikasi tersebut. Walau bagaimanapun, nilai penusukan bitumen SBS adalah 72.3% lebih rendah berbanding nilai penusukan bitumen konvensional 80/100. Titik lembut bitumen konvensional 80/100 adalah 52.3% lebih rendah daripada titik lembut bitumen terpinda SBS. Bitumen konvensional 80/100 juga didapati lebih mulur berbanding bitumen terpinda SBS.
2. Mesin penghancur Barmac berupaya menghasilkan zarah agregat yang berbentuk kubik berbanding agregat yang dihancurkan melalui kaedah lazim. Nilai graviti tentu yang direkodkan oleh agregat berkubik dan agregat ketaksekataan berjulat antara 2.6 hingga 2.7. Nilai penyerapan air bagi kedua-dua jenis agregat meningkat dengan penurunan saiz agregat. Agregat berkubik mencatatkan nilai penyerapan air yang lebih rendah berbanding agregat ketaksekataan. Hal yang demikian secara tidak langsung menunjukkan bahawa agregat berkubik mempunyai luas permukaan yang lebih rendah lalu mengurangkan nilai penyerapan air.
3. Nilai hentaman agregat (AIV) berkubik adalah lebih rendah berbanding agregat ketaksekataan. Ini menunjukkan agregat berkubik mempunyai susunan matriks yang lebih kukuh melalui bentuk yang lebih bergeometri jika dibandingkan dengan agregat ketaksekataan. Nilai pecahan agregat (ACV) yang berkubik adalah 14.7% lebih rendah berbanding agregat ketaksekataan yang dihancurkan melalui mod mampatan. Namun begitu, nilai ACV kedua-dua agregat adalah lebih rendah daripada yang dibenarkan oleh spesifikasi JKR (JKR, 1988) iaitu 30%.
4. Nilai indeks kekepingan agregat ketaksekataan adalah 54.8% lebih tinggi berbanding indeks kekepingan agregat berkubik. Nilai indeks kekepingan yang rendah dihajatkan untuk menghasilkan prestasi campuran asphalt yang baik. Indeks pemanjangan agregat berkubik adalah lebih rendah daripada agregat ketaksekataan dengan peratusan perbezaan yang dicatatkan sebanyak sebanyak 51.0%, 54.8% dan 58.6% masing-masing pada pecahan saiz 20-14mm, 14-10mm dan 10-6.3mm.
5. Reka bentuk campuran berasaskan kaedah Marshall digunakan untuk menentukan kandungan bitumen optimum setiap campuran. Kandungan bitumen optimum ditentukan berdasarkan nilai kestabilan, berat unit, 4% lompong, lompong dalam agregat dan modulus kebingkasan pada pelbagai kandungan bitumen. Kandungan bitumen optimum yang diperolehi dari campuran agregat ketaksekataan dan berkubik



menggunakan bitumen 80/100 masing-masing ialah 5.0% dan 4.8%. Kandungan bitumen setara untuk campuran bitumen SBS ialah 5.0% dan 4.7%. Secara umumnya, kandungan bitumen optimum campuran agregat berkubik adalah lebih rendah daripada campuran agregat ketaksekataan namun berada dalam julat yang disarankan dalam spesifikasi JKR (JKR, 1988).

6. Nilai modulus kebingkasan menurun dengan peningkatan suhu kajian. Apabila suhu ditingkatkan dari 25°C kepada suhu 40°C, nilai modulus kebingkasan campuran bitumen 80/100 menurun di antara 60.7% hingga 73.0%. Nilai setara untuk campuran bitumen SBS ialah di antara 62.7% hingga 75.6%. Walau bagaimanapun, campuran berbitumen SBS mempamerkan nilai modulus kebingkasan yang lebih tinggi berbanding campuran bitumen 80/100 pada setiap suhu ujian. Di samping itu, nilai modulus kebingkasan campuran agregat berkubik adalah lebih tinggi berbanding campuran agregat ketaksekataan.
7. Nilai kekukuhan rayapan menurun dengan meningkatnya suhu. Untuk campuran bitumen 80/100, peratus penurunan yang dicatatkan ialah sebanyak 10.7% hingga 36.0% apabila suhu ditingkatkan dari 40°C menjadi 60°C, manakala campuran bitumen SBS pula merekodkan peratus penurunan ber julat 16.5% hingga 51.8%. Walau bagaimanapun, campuran bitumen SBS dengan agregat berkubik memperlihatkan keupayaan yang terbaik dalam merintang kesan negatif yang diakibatkan oleh suhu.
8. Penggunaan bitumen SBS di dalam campuran konkrit asfalt meningkatkan nilai kekuatan tegangan tak langsung (ITS) sebanyak 1055 KPa dan 1329 KPa berbanding campuran bitumen lazim yang mencatatkan nilai ITS setara 957 KPa dan 979 KPa dengan peratusan peningkatan yang direkodkan adalah 10.2% hingga 35.8%.
9. Proses pengusiaan jangka pendek mengakibatkan pengerasan bitumen. Modulus kebingkasan kesemua campuran yang diusiakan secara jangka pendek meningkat di antara 1.2% sehingga 26.2%. Kekukuhan rayapan pula merekodkan peratus peningkatan di antara 5.7% hingga 16.8%, manakala kekuatan tegangan tak langsung memperlihatkan peratus peningkatan sebanyak 6.8% hingga 17.8%. Walau bagaimanapun, campuran berbitumen SBS adalah yang paling berpotensi untuk merintang kesan negatif yang diakibatkan oleh pengusiaan.
10. Pengusiaan jangka panjang yang melibatkan sinar ultra-unggu meningkatkan nilai modulus kebingkasan di antara 15.9% hingga 56.6%, manakala rayapan dinamik meningkat di antara 14.7% hingga 25.2%. Selain itu, kekuatan tegangan tak langsung merekodkan nilai peningkatan sebanyak 9.6% hingga 27.8%. Campuran bitumen SBS merupakan campuran yang berpotensi merintang proses pengusiaan jangka panjang.

## SENARAI RUJUKAN

- AASHTO, (2002a). Part 2A: T49-97, *Penetration of Bituminous Materials*. Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing. Washington D.C.
- AASHTO, (2002b). Part 2A: T53-96, *Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing. Washington D.C.
- AASHTO, (2002c). Part 2A: T51-00, *Ductility of Bituminous Materials*. Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing. Washington D.C.
- AASHTO, (2002d). T209-99. *Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing. Washington D.C.
- AASHTO, (2002e). Part 2B: R30-02, *Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*. Standard Specifications for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing. Washington D.C.
- ASTM, (2005a). D6927-04. *Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*. Annual books of ASTM Standard, Volume 4.03.
- ASTM, (2005b). D4123. *Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. Annual books of ASTM Standard, Volume 04.03.
- Jabatan Kerja Raya. (1988). *Standard Specifications for Road Work*. Jabatan Kerja Raya Malaysia, Kuala Lumpur.
- Banta, L., Cheng, K., and Zaniewski, J. (2003). *Estimation of limestone particle mass from 2-D images*. Powder Technology 132: 184-189.
- Brown, E.R., J.E. Haddock, T.A. Lynn, and R.B. Mallick (1998). *CRP-CD-1: Bituminous Materials Research Series; Designing Stone Matrix Asphalt Mixtures Volume II—Research Results for Phase II*, Final Report for NCHRP Project 9-8, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.
- Chowdhury, A., Button, J.W., Kohale, V., and Jahn, D. (2001). *Evaluation of Superpave Fine Aggregate Angularity Specification*. ICAR Report 201-1, International Center for Aggregates Research, TTI, Texas A&M University, College Station, Texas.
- JKR (1988), Standard Specification for Road Works, Jabatan Kwerja Raya Malaysia, Kuala Lumpur.
- Kandhal, P.S., and Mallick, R.B. (1997). *Aggregate Tests For Hot Mix Asphalt*. State of The Practice, National Center for Asphalt Technology of Auburn University. NCAT Report No. 97-6.
- Kalcheff, I.V., and Tunnicliff, D.G. (1982). *Effects of Crushed Stone Aggregate Size and Shape on Properties of Asphalt Concrete*. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, 51, 453-483.
- Kandhal, P.S. and F. Parker, Jr. (1998). *Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements*. In National Cooperative Highway Research Program Report 405, TRB, National Research Council, Washington, D. C.

## SENARAI PENERBITAN

1. Ramadhansyah P.J., Hamzah M.O. and Khairun Azizi M.A., (2006), Studies on Asphalt Aggregates for Mixture Design, 1<sup>st</sup> Civil Engineering Colloquium, Universiti Sains Malaysia, May 2006
2. Hamzah, M.O., Ramadhansyah P.J, Khairun Azizi M.A., (2006), Effects of Temperature and Binder Types on Resilient Modulus of Asphaltic Concrete, National Seminar on Civil Engineering Research (SEPKA), Universiti Teknologi Malaysia, Johor, December 2006
3. Hamzah M.O, Ramadhansyah P.J, Khairun Azizi M.A, Mahathir A, Raphuel Saravana Parakash Babu F. X (2007). Effects of Aggregate Shape and Binder Types on the Marshall Properties of Asphaltic Concrete. National Seminar on Materials, Mineral Resources and Polymers (MAMIP 2007), Universiti Sains Malaysia, April 2007
4. Raphuel Saravana Prakash Babu F. X, Hashim H, Khairun Azizi M.A, Mahathir A, Meor Othman H, Ramadhansyah P.J and Metso Minerals (2007). Enhance The Property of Granite Aggregate Through Metso Barmac Rock on Rock Vertical Shaft Impact (RoR VSI) crushing. National Seminar on Materials, Mineral Resources and Polymers (MAMIP 2007), Universiti Sains Malaysia, April 2007
5. Hamzah M.O, Ramadhansyah P.J., and Khairun Azizi M.A., (2007), Improving Asphaltic Concrete For Pavement Wearing Courses By Incorporating Geometrically Cubical Aggregate Shape, Proceedings of the Malaysian Infrastructure Technology Conference INFRATECH2007, pp. 43-50
6. Ramadhansyah P.J., Hamzah M.O., Khairun Azizi M.A. (2007), Effects Of Geometrically Cubical Aggregate on the Indirect Tensile Strength Properties of Asphaltic Concrete, National Civil Engineering Conference (SEPKA2007), Johor Bahru.
7. Ramadhansyah P.J, Hamzah M.O., Khairun Azizi M.A., (1988), Effects of Temperature and Binder Type on the Resilient Modulus of Asphaltic Concrete Incorporating Geometrically Cubical Aggregates Subjected to Ageing, International Seminar on Civil & Infrastructure Engineering 2008 (ISCIE '08), UiTM (akan dibentangkan)