

PENGARUH ADITIF ZEOLIT BAYAT TERHADAP KUAT TARIK TIDAK LANGSUNG CAMPURAN BERASPAL MODIFIKASI POLIMER HANGAT

Ani Tjitra Handayani
Jurusan Teknik Sipil
STTNAS Yogyakarta
Tlp. 0274-485390
ani.tjitra@sttnas.ac.id

Sri Ning Peni
Jurusan Teknik Geologi
STTNAS Yogyakarta
Tlp. 0274-485390
sriningpeni22@gmail.com

Abstract

Modified polymer asphalt warm mixture is one of the green technologies, which is intended to reduce the mixing temperature from 20°C up to 40°C lower than the hot mixing temperature, by adding an additive. This study uses Bayat Zeolite as an additive. The method used in this study is conducting several laboratory tests. The results show that the mixture containing 1.5% Bayat Zeolite has a higher indirect tensile strength and is more resistant to damage caused by water.

Keywords: warm asphalt mixture, additive, indirect tensile strength, mixing temperature

Abstrak

Campuran beraspal modifikasi polimer hangat adalah salah satu teknologi hijau, yang dimaksudkan untuk menurunkan temperatur pencampuran antara 20°C hingga 40°C lebih rendah daripada temperatur pencampuran panas, dengan menambahkan suatu aditif. Penelitian ini menggunakan Zeolit Bayat sebagai aditif. Metode yang digunakan pada studi ini adalah melakukan pengujian di laboratorium. Hasil penelitian ini adalah bahwa campuran yang mengandung Zeolit Bayat dengan kadar 1,5% mempunyai kuat tarik tidak langsung yang lebih tinggi dan lebih tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air.

Kata-kata kunci: campuran beraspal hangat, aditif, kuat tarik tidak langsung, temperatur pencampuran

PENDAHULUAN

Kerusakan dini pada lapis permukaan jalan sering ditemui pada konstruksi jalan. Terdapat banyak faktor yang memengaruhi kerusakan perkerasan lentur jalan, yang salah satunya adalah karena pengaruh air. Curah hujan yang tinggi ditambah dengan beban lalu lintas berlebih semakin mempercepat kerusakan perkerasan.

Kerusakan akibat air pada lapis beton aspal dapat disebabkan karena beberapa faktor, yaitu: (1) jenis agregat, baik agregat kasar maupun agregat halus, yang sensitif terhadap air sehingga beton aspal akan rentan mengalami *stripping*, (2) sumber minyak dan proses distilasinya sampai menjadi aspal, (3) kadar rongga udara dan permeabilitas campuran yang memengaruhi pengaliran air dan udara, (4) ketebalan lapis aspal yang memengaruhi durabilitas campuran, dan (5) kondisi lingkungan dan volume lalu lintas yang memengaruhi tingkat terjadinya *stripping* (Roque dan Buttlar, 1992).

Uji kuat tarik tidak langsung pada campuran beton aspal adalah suatu prosedur yang sering digunakan untuk memperkirakan kinerja perkerasan beton aspal. Saat ini, uji

kuat tarik tidak langsung banyak digunakan untuk mengetahui kerentanan beton aspal terhadap kelembapan. Namun, uji kuat tarik tidak langsung ini juga dapat digunakan untuk menentukan sifat teknik yang diperlukan untuk analisis elastis dan viskoelastis serta untuk mengevaluasi retak termal, retak kelelahan, dan masalah lain yang potensial (Garrick dan Biskur, 1990).

Kekuatan tarik dipengaruhi oleh temperatur dan lama pembebanan (Asphalt Institute, 1993). Kenaikan temperatur akan menyebabkan kekentalan aspal menurun, yang disebabkan oleh meningkatnya energi termal (*thermal energy*) dan melarutnya *asphaltenes* ke dalam *oil*. Jika dikaitkan dengan lalu lintas, pembebanan yang lama akan terjadi pada lalu lintas dengan kecepatan rendah. Semakin lama pembebanan pada perkerasan, aspal yang semula bersifat elastik akan menjadi bersifat lebih *viscous*.

Campuran beraspal hangat (*Warm Mix Asphalt*, WMA) adalah suatu jenis campuran beraspal yang menggunakan teknologi yang berbasis teknologi hijau. Dengan menggunakan teknologi ini, WMA diproduksi dengan temperatur pencampuran yang lebih rendah (20°C–40°C) daripada temperatur pencampuran untuk campuran beraspal panas (*Hot Mix Asphalt*, HMA), dengan menambahkan aditif. Bahan aditif yang digunakan dapat berupa bahan yang berbasis air maupun bahan aditif yang merupakan *rheological modifier*. Saat ini, contoh bahan aditif yang terdapat di pasaran adalah zeolit sintetis dengan merk dagang Aspha-min^(R), Sasobit^(R), dan Advera^(R).

Indonesia memiliki cadangan zeolit alam yang besar, yang terdapat di beberapa tempat, termasuk di Provinsi Jawa Tengah. Zeolit alam mempunyai sifat mengeluarkan air yang tersimpan dalam rongga batuan pada temperatur lebih tinggi daripada 100°C, sehingga diharapkan dapat membantu proses pembuatan campuran beraspal dan pada saat pemadatan. Oleh karena itu, pemanfaatan zeolit alam untuk konstruksi perkerasan lentur merupakan potensi yang menjanjikan dalam pengembangan perancangan campuran beraspal hangat yang menggunakan aspal modifikasi polimer.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh air terhadap potensi terjadinya kelelahan (*fatigue*) dan alur (*rutting*) perkerasan lentur, dengan melakukan pengujian kuat tarik tak langsung campuran beraspal hangat yang menggunakan Zeolit Bayat sebagai aditif. Sebagai pembanding adalah campuran beraspal panas (tanpa aditif Zeolit Bayat) yang menggunakan aspal modifikasi polimer dan menggunakan aspal dengan penetrasi 60/70. Temperatur pencampuran dan temperatur pemadatan yang digunakan masing-masing adalah 146°C dan 132°C.

Secara garis besar, penelitian ini dilakukan dalam 9 tahap, yaitu: (1) Persiapan material yang akan digunakan (agregat, aspal penetrasi 60/70, aspal modifikasi polimer elastomer dan Zeolit Bayat lolos saringan No. 400); (2) Pengujian mutu material yang digunakan; (3) Pengolahan Zeolit Alam Bayat menggunakan metode aktivasi kimia; (4) Penentuan kadar aspal optimum masing-masing campuran; (5) Pembuatan 3 jenis campuran dengan kadar aspal optimum masing-masing campuran, yaitu 2 variasi campuran pembanding (campuran dengan aspal penetrasi 60/70 dan campuran dengan aspal polimer) dan 1 campuran aspal polimer menggunakan aditif Zeolit Bayat lolos saringan Nomor 400;

(6) Pengujian Marshall masing-masing campuran; (7) Pembuatan campuran beraspal polimer menggunakan aditif Zeolit Bayat 1,5% terpilih dengan 5 variasi temperatur pencampuran dan temperatur pemadatan (176°C dan 162°C, 166°C dan 152°C, 156°C dan 142°C, 146°C dan 132°C, serta 136°C dan 122°C); (8) Pengujian kuat tarik tidak langsung campuran; dan (9) Analisis terhadap data hasil pengujian laboratorium.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material

Pengujian terhadap material yang digunakan meliputi pemeriksaan karakteristik fisik agregat kasar, agregat sedang, agregat halus, aspal, dan Zeolit Alam Bayat. Pemeriksaan ini merupakan langkah awal untuk mengetahui apakah agregat, aspal, dan Zeolit Alam Bayat, yang digunakan sebagai bahan aditif, mempunyai karakteristik atau memenuhi spesifikasi yang digunakan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2010). Hasil pengujian agregat dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2, hasil pengujian aspal dapat dilihat pada Tabel 3, serta hasil pengujian Zeolit Alam Bayat dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 1 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Hasil	Spek.	Satuan
1.	Abrasi	SNI 03-2417-2008	17,5	≤ 40	%
2.	<i>Bulk Specific Gravity</i>	SNI 03-1969-2008	2,647	$> 2,5$	gr/cc
3.	<i>Saturated Surface Dry</i>	&	2,688	$> 2,5$	gr/cc
4.	<i>Apparent Specific Gravity</i>	SNI 03-1970-2008	2,760	< 3	gr/cc
5.	Absorption (penyerapan)	SNI 03-1969 -2008	1,543	≤ 3	%
6.	Angularitas Agregat Kasar	ASTM D 4791-2005	99,9/99,6	$\geq 95/90$	%
7.	Partikel Pipih dan Lonjong	ASTM D 4791-2005	1,0	≤ 10	%
8.	Pelapukan	SNI 03-3407-1994	0,3	≤ 12	%

Tabel 2 Hasil Pengujian Agregat Sedang

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Hasil	Spek.	Satuan
1.	<i>Bulk Specific Gravity</i>	SNI 03-1969-2008	2,676	$> 2,5$	gr/cc
2.	<i>Saturated Surface Dry</i>	&	2,710	$> 2,5$	gr/cc
3.	<i>Apparent Specific Gravity</i>	SNI 03-1970-2008	2,771	< 3	gr/cc
4.	Absorption (penyerapan)	SNI 03-1969 -2008	1,269	≤ 3	%
5.	Kelekatan terhadap Aspal	SNI 03-2439-1991	+ 95	≥ 95	%
6.	Pelapukan	SNI 03-3407-1994	0,4	≤ 12	%
7.	Lolos Saringan No. 200	SNI 03-4142-1996	0,53	≤ 1	%

Hasil Pengujian Agregat

Berdasarkan hasil pengujian mutu agregat kasar dan halus seperti terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 bahwa nilai kedua pengujian pada kedua ukuran agregat ini memenuhi spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga (2010). Sementara itu, berdasarkan hasil pengujian yang terdapat pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 dapat dinyatakan bahwa mutu agregat kasar dan agregat halus telah memenuhi spesifikasi Direktorat Jenderal Bina

Marga (2010). Dengan demikian agregat tersebut dapat digunakan sebagai material pada penelitian ini.

Tabel 3 Hasil Pengujian Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Hasil	Spek.	Satuan
1.	Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	61,0	≥ 60	%
2.	<i>Bulk Specific Gravity</i>	SNI 03-1969-2008	2,658	$> 2,5$	gr/cc
3.	<i>Saturated Surface Dry</i>	&	2,691	$> 2,5$	gr/cc
4.	<i>Apparent Specific Gravity</i>	SNI 03-1970-2008	2,748	< 3	gr/cc
5.	<i>Absorption</i> (penyerapan)	SNI 03-1969-2008	1,235	≤ 3	%
6.	Angularitas Agregat Kasar	ASTM D 4791-2005	48,5	≥ 45	%
7.	Gumpalan Lempung	ASTM D 4791-2005	1,8	≤ 1	%
8.	Pelapukan	SNI 03-3407-1994	0,40	≤ 12	%

Hasil Pengujian Aspal

Pemeriksaan terhadap aspal dilakukan untuk mengetahui karakteristik aspal polimer serta aspal penetrasi 60/70 yang digunakan sebagai bahan pengikat pada campuran pembanding. Hasil pemeriksaan aspal polimer dan aspal penetrasi 60/70 disajikan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Hasil Pengujian Aspal Polimer

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Hasil	Spek.	Satuan
1.	Penetrasi pada 25°C, 100 g, 5 detik	SNI 06-2456 : 2011	61	50–0	0,1 mm
2.	Viskositas pada 135°C	SNI 06-6441-2000	818	≤ 2000	cSt
3.	Titik lembek	SNI 06-2434 : 2011	53,5	-	°C
4.	Daktilitas pada 25°C, 5 cm / menit	SNI 06-2432 : 2011	> 140	≥ 100	Cm
5.	Titik nyala (COC)	SNI 06-2433 : 2011	332	≥ 232	°C
6.	Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃	SNI 06-2438-1991	99,8663	Min. 99	%
7.	Berat jenis	SNI 06-2441 : 2011	1,036	$\geq 1,0$	gr/cc
8.	Kehilangan berat (TFOT)	SNI 06-2440-1991	0,0145	$\leq 2,2$	%
9.	Perbedaan titik lembek	ASTM D 5976 part. 6.1	0,2	$\leq 0,8$	°C
10.	Penetrasi setelah TFOT	SNI 06-2456 : 2011	85,2	≥ 54	%
11.	Titik lembek setelah TFOT	SNI 06-2434 : 2011	55,5	-	°C
12.	Daktilitas setelah TFOT	SNI 06-2432 : 2011	> 140	≥ 50	Cm
13.	Perkiraan temperatur pencampuran	AASHTO-72-1990	173–179	-	°C
14.	Perkiraan temperatur pemadatan	AASHTO-72-1990	159–165	-	°C

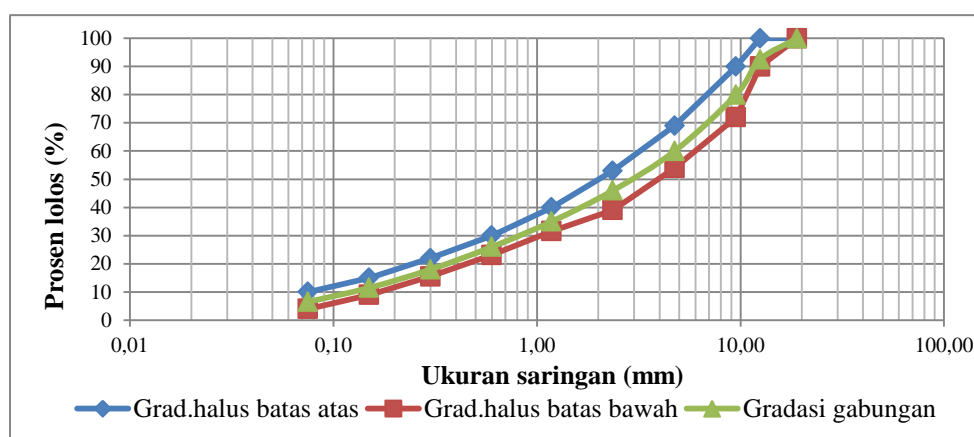
Tabel 5 Hasil Pengujian Aspal Penetrasi 60/70

No.	Jenis Pengujian	Metoda Pengujian	Hasil	Spek.	Satuan
1	Penetrasi pada 25°C, 100 g, 5 detik	SNI 06-2456 : 2011	65	60–70	0,1 mm
2	Titik lembek	SNI 06-2434 : 2011	49,5	≥ 48	°C
3	Viskositas pada 135°C	SNI 06-6441-2000	420	≥ 300	cSt
4	Daktilitas pada 25°C, 5 cm/menit	SNI 06-2432 : 2011	> 140	≥ 100	cm
5	Titik nyala (COC)	SNI 06-2433 : 2011	312	≥ 232	°C
6	Kelarutan dalam C ₂ HCl ₃	SNI 06-2438-1991	99,8876	≥ 99	%
7	Berat jenis	SNI 06-2441 : 2011	1,039	$\geq 1,0$	gr/cc
8	Kehilangan berat (TFOT)	SNI 06-2440-1991	0,0026	$\leq 0,8$	%
9	Penetrasi setelah TFOT	SNI 06-2456 : 2011	81,5	≥ 54	%
10	Titik lembek setelah TFOT	SNI 06-2434 : 2011	52,1	-	°C
11	Daktilitas setelah TFOT	SNI 06-2432 : 2011	> 140	≥ 100	cm
12	Perkiraan temperatur pencampuran	AASHTO-72-1990	154–159	-	°C
13	Perkiraan temperatur pemadatan	AASHTO-72-1990	142–148	-	°C

Berdasarkan hasil pengujian yang terdapat pada Tabel 4 dan Tabel 5 terlihat bahwa karakteristik aspal polimer maupun aspal penetrasi 60/70 (sebagai pembandingan) telah sesuai dengan spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga (2010). Dengan demikian aspal-aspal tersebut dapat digunakan pada penelitian ini.

Hasil Pengujian Gradasi

Grafik rancangan gradasi gabungan agregat disajikan pada Gambar 1. Berdasarkan hasil pengujian gradasi yang telah dilakukan, dinyatakan bahwa gradasi gabungan agregat yang digunakan untuk studi ini memenuhi spesifikasi Direktorat Jenderal Bina Marga (2010) untuk campuran beraspal AC-WC. Hal ini ditunjukkan dengan tidak adanya nilai gradasi gabungan yang kurang dari batas minimum atau melebihi batas maksimum yang disyaratkan oleh spesifikasi yang digunakan.



Gambar 1 Gradasi Agregat

Hasil Pengujian Komposisi Kimia Zeolit Bayat

Komposisi kimia Zeolit Bayat yang digunakan pada studi ini diuji di laboratorium. Zeolit Bayat yang diuji merupakan zeolit alam bayat yang lolos saringan No. 400. Hasil pengujian komposisi Zeolit Bayat dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil Pengujian Komposisi Zeolit Bayat

Unsur Kimia	Zeolit Sintetis	Zeolit Bayat
SiO ₂	50,9	63,9676
Al ₂ O ₃	31	12,4938
CaO	0,078	1,2754
Fe ₂ O ₃	4,49	2,0549
K ₂ O	0,95	0,6320
P ₂ O ₅	0,31	ttd
TiO ₂	5,40	0,0698
H ₂ O	3,51	3,67

Catatan: ttd = tidak terdeteksi atau di bawah batas deteksi alat

Dari pengujian komposisi kimia yang terdapat pada Tabel 6, terlihat bahwa Zeolit Bayat mempunyai kandungan Oksida Silika (SiO₂) sebesar 63,9676. Hal ini mengindikasikan

bahwa Zeolit Bayat mempunyai rongga yang besar dan dapat menahan serta melepaskan air dengan cepat tanpa merusak struktur kristalnya.

Hasil aktivasi kimia, kadar air asli sebelum dilakukan pengolahan pada zeolit alam, nilai kadar air Zeolit Bayat adalah 3,67%. Setelah dilakukan pengolahan dengan aktivasi kimia, nilai kadar air Zeolit Bayat menjadi sebesar 18,99%. Secara keseluruhan, dengan melihat hasil pengolahan zeolit menggunakan aktivasi kimia, didapatkan kadar air yang mendekati kadar air zeolit sintetis, yaitu antara 15% hingga 20%.

Hasil Pengujian Karakteristik Marshall

Hasil pengujian Marshall menggunakan variasi penurunan temperatur pencampuran dan pemadatan pada campuran beraspal polimer dengan kadar Zeolit Alam 1,5%, yang lolos saringan No. 400, dapat dilihat pada Tabel 7. Pada Tabel 7 tersebut terlihat bahwa untuk campuran beraspal hangat, yang menggunakan aspal polimer dan aditif Zeolit Bayat, penurunan temperatur pencampuran dan pemadatan optimum yang memenuhi syarat standar Marshall adalah 30°C, yaitu pada temperatur 146°C/132°C.

Tabel 7 Hasil Pengujian Marshall Menggunakan Variasi Penurunan Temperatur Pencampuran dan Temperatur Pemadatan

Karakteristik Campuran	Variasi Penurunan Temperatur Pencampuran dan Pemadatan				Spesifikasi
	176°C/162°C	166°C/152°C	156°C/142°C	146°C/132°C	
Kadar Aspal	5,8	5,8	5,8	5,8	%
Kepadatan	2,35	2,381	2,374	2,368	ton/m ³
VMA	16,41	15,73	16,01	16,20	min. 15%
VFB	77,15	76,90	75,24	74,22	min. 65%
VIM Marshall	3,75	3,64	3,97	4,18	3,0 - 5,0%
Stabilitas	1627,7	1587,4	1468,0	1646,9	min. 1000 kg
Kelelahan	4,00	5,08	4,28	3,67	min. 3 mm
Marshall Quotient	321,5	277,6	345,2	426,7	min. 300kg/mm
Kadar Aspal Efektif	5,4	5,26	5,3	5,27	min. 4,3%

Hasil Pengujian Kuat Tarik Tak Langsung

Pengujian kuat tarik tak langsung (*Indirect Tensile Test*, ITS) dimaksudkan untuk mengetahui kekuatan campuran akibat pengaruh air, yang dilakukan sesuai dengan metode AASHTO T-283. Pengujian ini dibedakan menjadi 2 macam, yaitu yang langsung dan yang mengalami pengkondisian perendaman terlebih dahulu. Selanjutnya, dilakukan pengujian kuat tarik tidak langsung dari masing-masing keadaan dan dihitung perbandingan kuat tarik tak langsung (*Indirect Tensile Strength Ratio*, ITS_R), yaitu kekuatan benda uji yang mengalami rendaman (ITS Rendaman) dibagi kekuatan benda uji yang diuji secara langsung (ITS Langsung). Nilai ITS dan TSR yang diperoleh dari pengujian ini disajikan pada Tabel 8.

Hubungan Kandungan Zeolit Bayat dengan Nilai ITS

Kekuatan campuran beton aspal sangat dipengaruhi oleh stabilitas yang berhubungan dengan kekuatan ikatan atau penguncian antaragregat dan kekuatan lekatan antara agregat

dan aspal. Campuran yang mengandung 1,5% zeolit mempunyai nilai ITS tertinggi. Hal ini disebabkan air menyebabkan naiknya sifat adhesi atau kerekatan aspal terhadap agregat.

Tabel 8 Hasil Pengujian ITS dan Nilai ITSR

Pengujian	Jenis Campuran		
	Campuran Aspal Modifikasi	Campuran Beraspal Modifikasi + 1,5% Zeolit	Campuran Beraspal Pen. 60/70
ITS Langsung	953,0	972,6	591,4
ITS Rendaman	728,20	791,74	454,52
ITSR (%)	76,4	81,404	76,9

Hasil pengujian ITS dapat menggambarkan perkiraan potensi terjadinya *stripping* atau terlepasnya butiran-butiran agregat dari campuran. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai ITS campuran yang mengandung Zeolit Bayat, dengan kadar 1,5%, relatif lebih tinggi jika dibandingkan dengan campuran beraspal modifikasi tanpa aditif Zeolit Bayat maupun campuran beraspal yang menggunakan aspal penetrasi 60/70 tanpa aditif Zeolit Bayat. Hal ini terjadi karena pada saat pencampuran, zeolit memberikan busa yang dapat membantu proses penyelimutan agregat menjadi optimum, sehingga ikatan antar-agregat lebih baik dan air menjadi semakin susah memasuki rongga-rongga di dalam campuran, sehingga kelekatan dan kekuatan tariknya menjadi lebih tinggi.

Hubungan Kandungan Zeolit Bayat dengan Nilai ITSR

Nilai ITSR dapat menggambarkan perkiraan kerentanan campuran terhadap air. Potensi kerusakan terhadap air diindikasikan dengan perbandingan antara nilai ITS dengan proses perendaman dengan nilai ITS langsung (tanpa perendaman). Nilai ITSR yang kurang dari 80% mengindikasikan bahwa campuran rentan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air, sedangkan nilai ITSR yang lebih dari 80% mengindikasikan bahwa campuran tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air. Nilai ITSR pada campuran dengan kandungan 1,5% Zeolit Bayat adalah 81,404%, dan nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai-nilai untuk campuran beraspal modifikasi yang tidak mengandung zeolit maupun campuran beraspal penetrasi 60/70 yang tidak mengandung Zeolit Bayat.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Nilai ITS pada campuran yang mengandung Zeolit Bayat dengan kadar 1,5% lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak menggunakan Zeolit Bayat. Hal ini terjadi karena pada saat pencampuran zeolit memberikan busa yang dapat membantu proses penyelimutan agregat menjadi optimum, sehingga ikatan antaragregat lebih baik dan air menjadi semakin susah memasuki rongga-rongga dalam campuran. Hal ini menyebabkan kelekatan aspal dan agregat meningkat dan kekuatan tarik campuran menjadi tinggi.

- 2) Nilai ITSR pada campuran dengan menggunakan Zeolit Bayat dengan kadar 1,5% adalah 81,404%. Nilai ini lebih besar daripada syarat minimum (80%), yang berarti bahwa campuran lebih tahan terhadap kerusakan yang disebabkan oleh air.

DAFTAR PUSTAKA

- Asphalt Institute. 1993. *Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types*. MS-2 Sixth Edition. Lexington: Asphalt Institute.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2010. *Spesifikasi Umum Revisi 3*. Kementerian Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Garrick, N.W., dan Biskur, R.R. 1990. *Effects of Asphalt Properties on Indirect Tensile Strength*. Transportation Research Record No. 1269, hlm. 26–39. Transportation Research Board. (Online), (http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/out_of_print.htm, diakses 20 Agustus 2009).
- Roque, R. dan Buttlar, W.G. 1992. *The Development of A Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode (With Discussion)*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 61: 304–332.