



STUDI AWAL PENGARUH PERUBAHAN IKLIM TERHADAP PERKERASAN KAKU DI ATAS TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

IMAN HARYANTO¹, HERU BUDI UTOMO^{1*}

¹Teknik Sipil, Sekolah Vokasi, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Corresponding author: ✉ imanh@ugm.ac.id

Naskah diterima : 23 November 2021. Disetujui: 8 Maret 2022

ABSTRAK

Perubahan iklim berpotensi merusak infrastruktur termasuk struktur perkerasan kaku. Perkerasan yang dibangun pada tanah dasar tanah ekspansif rentan terhadap kerusakan, termasuk *pumping*. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi dampak perubahan iklim terhadap struktur perkerasan kaku. Data suhu udara dan curah hujan tahunan rerata di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta adalah 26,71°C dan 200,13 mm. Proyeksi perubahan iklim Bank Dunia menyebutkan bahwa pada periode 2080-an suhu udara meningkat 0,3°C per dekade dan curah hujan tahunan rerata menurun 15%. Metode yang digunakan adalah *Thornthwaite Moisture Index* (TMI) (sebagai indikator penciri iklim) dan metode empiris untuk menghitung jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping*. Lima tipe perkerasan kaku yang terdapat dalam Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 dipelajari sebagai obyek studi. Beberapa hasil studi adalah sebagai berikut. Perubahan TMI pada tahun 1976, 2016, 2019, dan 2080-an adalah 36,8; 48,07; 6,71; dan -57,54. *Pumping index* sebesar = 134 in³ per in *length* dapat menghasilkan variasi *void depths* > 5 cm, sehingga perkerasan kaku dapat mengalami kehilangan dukungan (*loss of support*). Perubahan iklim meningkatkan *pumping* perkerasan kaku tanpa tulangan antara 18–32%. Lima tipe perkerasan kaku yang terdapat MDP 2017 memiliki *pumping index* kurang dari 134 in³ per in *length*, sehingga perubahan iklim diperkirakan tidak mengakibatkan tipikal perkerasan kaku standar di Indonesia mengalami kehilangan dukungan (*loss of support*). Perkerasan kaku tanpa tulangan terindikasi lebih mudah mengalami *pumping erosion* akibat perubahan iklim daripada perkerasan kaku dengan tulangan

Kata kunci : perubahan iklim, Thornthwaite Moisture Index, perkerasan kaku, lempung ekspansif, pumping index

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah perubahan kondisi umum cuaca dan meningkatnya kejadian cuaca ekstrim. Data suhu udara dan curah hujan bulanan rerata di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta periode 2016-2019 adalah 26,71°C dan 200,13 mm (diolah dari data yang bersumber dari <https://yogyakarta.bps.go.id/subject/151/iklim.html#subjekViewTab3>). World Bank Group menyajikan hasil studi perubahan iklim di Indonesia sampai dengan tahun 2080-

an. Studi tersebut menggunakan *Global Climate Model*. Proyeksi ringkas perubahan iklim di Indonesia adalah peningkatan suhu udara 0,2-0,3°C per dekade dan peningkatan curah hujan tahunan rerata di sebagian besar wilayah Indonesia, kecuali di wilayah selatan Indonesia yang menurun 15% (The World Bank Group, 2011), (termasuk Pulau Jawa)(Case et al., 2007). Cuaca ekstrim telah meningkatkan frekuensi hujan berintensitas tinggi, banjir, longsor, kekeringan, dan perubahan pola musim. Dampaknya luas, bukan hanya sektor pertanian melainkan juga infrastruktur, termasuk perkerasan kaku. Beberapa komponen banjir, seperti kedalaman banjir, durasi banjir, kecepatan banjir, *flood debris*, dan *flood contaminants*, berpengaruh terhadap infrastuktur (van de Lindt & Taggart, 2009)(Huizinga et al., 2017). Perubahan suhu mempengaruhi pelengkungan pelat beton (*warping*), muai susut sambungan beton, dan sifat workabilitas beton segar.

Ada beberapa jenis kerusakan yang dapat menurunkan tingkat pelayanan perkerasan kaku, yaitu retak memanjang, retak melintang, gompal pada sambungan (*joint spalling*), pecah sudut (*corner break*), dan *pumping* (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2011). Selain itu, pelat beton perkerasan kaku juga dapat mengalami kerusakan *faulting* (pergeseran vertikal pelat beton) dan perubahan musiman profil melintang jalan. *Pumping* adalah pergerakan atau terangkatnya material halus lapis fondasi atau tanah dasar (*subgrade*) di bawah pelat (*slab*) beton akibat tekanan air melalui retakan atau sambungan (baik memanjang, melintang, atau tepi perkerasan dan bahu)(Roesler. J.R., Hiller, J.E., Brand, 2016). Tingkat keparahan *pumping* dapat dinilai dari *pumping index*, yaitu volume material halus yang terangkat ke sambungan/tepi pelat beton (dinyatakan dalam satuan in³ per in *length* pelat beton). Nilai *pumping index* perkerasan kaku yang tingkat pelayanannya minimum atau setara dengan $p = 1,5$ berkisar antara 5 – 209 (Highway Research Board, 1962). *Pumping* mengakibatkan terbentuknya rongga (*voids* atau *cavities*) di bawah pelat beton, sehingga perkerasan kaku kehilangan dukungan (*loss of support*) (Darter, M.I., Hall, K.T., Kuo, 1995). Rongga awalnya muncul di bawah sudut-sudut pelat beton, kemudian melebar ke area sambungan melintang antar pelat, meluas ke area sambungan memanjang antar pelat, dan pada akhirnya saling menyatu membentuk luasan rongga empat sisi (Wen et al., 2017). Rongga berkedalaman lebih dari 0,05 in (1,3 mm) mengakibatkan pelat beton mengalami lendutan yang signifikan ketika dibebani (Roesler. J.R., Hiller, J.E., Brand, 2016). Perubahan musiman profil melintang jalan diakibatkan oleh gaya dorong atau pengangkatan tanah (*heave*). Tepi perkerasan biasanya turun sehingga elevasinya sedikit di bawah as jalan (Highway Research Board, 1962).

Tanah lempung ekspansif mengalami siklus kembang susut di lapisan zona aktif, yaitu lapisan lempung yang kadar airnya berfluktuasi sesuai perubahan musim (Christodoulis, 2015). Sifat kembang susut tanah mengakibatkan gaya dorong tanah non seragam (*differential heave*) atau penurunan tanah non seragam (*differential settlement*). *Differential heave* atau *differential settlement* mengakibatkan penurunan cembung (*convex settlement*) atau penurunan cekung (*concave settlement*). Pelat beton yang mengalami penurunan cembung (*convex shape*) dapat mengalami pecah sudut. Pelat beton yang mengalami penurunan cekung (*concave shape*) mengalami resultan tegangan dari lalulintas, penurunan, dan perbedaan suhu (*differential temperatures*) bagian atas dan bawah pelat beton. Sifat kembang susut juga mengakibatkan pergerakan horizontal pelat beton dan tanah dasar yang menimbulkan tambahan tegangan dan regangan aksial. Sifat kembang susut dipengaruhi siklus basah dan kering, sementara siklus basah dan kering dapat berubah sesuai perubahan musim. Tanah lempung dipadatkan yang digunakan sebagai lapis fondasi perkerasan kaku memiliki faktor erosi 10, tertinggi dibandingkan jenis material lapis fondasi lainnya. Sebagai tanah dasar, lempung aktifitas tinggi (*high activity clay*) berpotensi memberikan tambahan rongga (*extra voids*) 50-150% di bawah pelat beton perkerasan kaku (yang mengalami *pumping*) (<http://cncpave.cemcon-sa.org.za>). Oleh karena itu, patut diduga bahwa perubahan iklim (atau musim jangka panjang) akan berdampak terhadap kerusakan perkerasan kaku pada tanah dasar lempung ekspansif.

Mochtar (2000) dan Sudjianto (2007) dalam (Giovanni et al., 2018) menyatakan bahwa tanah lempung ekspansif hampir terdapat diseluruh Indonesia, mulai dari Nangroe Aceh Darussalam (NAD) sampai ke Papua. Khusus di Pulau Jawa, Tanah lempung ekspansif terdapat di beberapa daerah seperti di Jawa Timur (Surabaya, Gresik, Probolinggo, Jombang, dan Ngawi), Jawa Tengah (Semarang, Purwodadi, Kudus, dan Cepu), Yogyakarta (Wates), dan Jawa Barat (Serang, Cikarang, Karawang, Cikampek, dan Bandung). Sifat kembang susut tanah ekspansif di Indonesia bervariasi dari sedang – sangat tinggi. Peneliti Pusat Penelitian Jalan dan Jembatan (Suherman, 2005) menyatakan bahwa tanah dasar kelempungan ruas jalan Semarang–Purwodadi, Dempet–Godong, Demak–Kudus, Wirosari–Cepu, Ngawai–Caruban, Surabaya–Gresik–Lamongan, Yogyakarta–Wates–Purworejo, jalan tol Jakarta–Cikampek memiliki sifat pengembangan tinggi–sangat tinggi. Namun, (Muntohar, 2006) menyebutkan bahwa tanah dasar lempung ekspansif di ruas jalan Wates–Purworejo memiliki tingkat pengembangan rendah – tinggi. Meskipun terdapat variasi hasil temuan atau studi, tetapi para peneliti sepakat bahwa kerusakan jalan akibat perilaku tanah ekspansif perlu diantisipasi untuk mencegah potensi kerugian yang relatif besar.

Direktorat Jenderal Bina Marga mengeluarkan Suplemen Manual Desain Perkerasan (MDP) 2017 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020). Namun, baik MDP 2017 dan Suplemen MDP 2017 belum secara spesifik mengatur ketentuan teknis struktur perkerasan kaku di atas tanah dasar lempung ekspansif yang mengantisipasi perubahan iklim. Sementara itu, (Jung et al., 2009) setelah Rauhut (1982) menyajikan model empiris untuk menghitung jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping* pada pelat beton perkerasan kaku yang telah memasukkan indikator iklim, seperti *Thorntwaite Moisture Index* (TMI) dan curah hujan tahunan. Oleh karena itu, studi ini menggunakan model empiris perhitungan jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping* yang terdapat dalam (Jung et al., 2009) untuk mengkaji potensi dampak perubahan iklim terhadap struktur perkerasan kaku pada tanah dasar ekspansif di Indonesia.

Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi dampak perubahan iklim terhadap *pumping erosion* struktur perkerasan kaku, baik tanpa maupun dengan tulangan. Analisis dilaksanakan dengan latar belakang utama kondisi iklim di Daerah Istimewa Yogyakarta.

2. METODA PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan sebagai berikut.

1. Pengumpulan dan pengolahan data historis komponen iklim dan TMI Daerah Istimewa Yogyakarta dan proyeksi perubahan iklim di Indonesia. Sumber data yang digunakan adalah <https://yogyakarta.bps.go.id/subject/151/iklim.html#subjekViewTab3>, yaitu data curah hujan per bulan tahun 2015-2019 serta suhu udara, jumlah hujan, dan hari hujan per bulan di D.I. Yogyakarta tahun 2016. Studi ini menggunakan hasil proyeksi perubahan iklim di Indonesia yang dipublikasikan oleh dua studi terdahulu, yaitu (Case et al., 2007) dan (The World Bank Group, 2011). Studi tersebut menggunakan *Global Climate Model* untuk memproyeksikan perubahan iklim di Indonesia sampai dengan tahun 2080-an.
2. Penentuan parameter teknis evaluasi perkerasan kaku berdasarkan MDP 2017.
3. Analisis *pumping erosion* perkerasan kaku tanpa dan dengan tulangan berdasarkan perubahan faktor iklim menggunakan model empiris perhitungan jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping* yang terdapat dalam (Jung et al., 2009). Analisis tersebut menghasilkan prediksi *pumping erosion* perkerasan kaku tanpa dan dengan tulangan pada dua kondisi yaitu, berdasarkan parameter iklim saat ini dan proyeksi iklim tahun 2080-an.

4. Analisis kehilangan dukungan (*loss of support*) perkerasan kaku. Analisis tersebut bertujuan untuk memperoleh kriteria *pumping erosion* yang mengindikasikan perkerasan kaku mengalami kehilangan dukungan.
5. Interpretasi hasil. Interpretasi hasil dilaksanakan dengan mengkaji perbandingan *pumping erosion* perkerasan kaku tanpa dan dengan tulangan serta kemungkinannya mengalami kehilangan dukungan akibat perubahan perubahan iklim.

Studi awal ini menggunakan data sekunder, hasil atau temuan penelitian terdahulu, dan standar atau pedoman yang relevan dengan perubahan iklim, perkerasan kaku, dan tanah dasar lempung ekspansif di Indonesia dan Daerah Istimewa Yogyakarta.

3. ANALISIS PENELITIAN

3.1. Profil Data Historis Komponen Iklim Dan Proyeksi Perubahan Iklim

Pengumpulan dan pengolahan data historis dan proyeksi perubahan iklim adalah sebagai berikut. Tabel 1 menyajikan curah hujan bulanan rerata berdasarkan data historis wilayah iklim Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Tabel 2 menyajikan data historis suhu udara per bulan DIY tahun 2016. Tabel 3 menyajikan data historis curah hujan per bulan DIY tahun 2019.

Tabel 1. Curah Hujan Bulanan Rerata DIY

Wilayah iklim	Curah hujan bulanan rerata (mm)					Curah hujan bulanan rerata (mm)
	2015	2016	2017	2018	2019	
Kulonprogo	288	250,9	221	224,9	138,8	224,7
Bantul	226,8	378,8	128,8	86,1	136	191,3
Gunungkidul	305,6	186,3	198,9	138,8	153,1	196,5
Sleman	251	351,3	311,1	182	195,4	258,2
Yogyakarta	179	N/A	115,9	94,9	N/A	129,9
Curah hujan bulanan rerata (mm)						200,12
Curah hujan tahunan rerata (mm)						240,14

Tabel 2. Data Historis Suhu Udara Dan Curah Hujan Per Bulan Di DIY Tahun 2016

	Suhu udara dan curah hujan per bulan di DIY											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Ags	Sep	Okt	Nov	Des
Suhu maksimum (°C)	33	31,2	32,3	32,5	32,2	31,4	31,8	31,5	32	31,9	31	30,8
Suhu minimum (°C)	24,1	23,7	23,9	24,2	24,2	23,2	23,1	22,6	23,1	23,5	23,5	23,5
Suhu rerata (°C)	27,5	26,5	26,8	27,3	27,2	26,4	26,5	26,1	26,8	26,7	26,3	26,4
Curah hujan (mm)	152	323	425	185	138	297	106	94,5	237,2	324	508,2	267,8

Tabel 3. Data Historis Curah Hujan Per Bulan Di DIY Tahun 2019

Kabupaten	Curah hujan per bulan di empat kabupaten D.I. Yogyakarta (mm)												Curah hujan tahunan (cm)
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Juni	Juli	Ags	Sep	Okt	Nov	Des	
Kulonprogo	500	196	531	22	15	0	0	0	0	0	64	338	166,6
Bantul	427	226	511	89	8	0	0	2	0	0	99	270	163,2
Gunungkidul	505	200	527	164	36	0	0	0	0	0	131	274	183,7
Sleman	457	337	560	413	22	0	1	1	0	0	164	390	234,5
Curah hujan tahunan rerata (cm)													187

Variabel suhu dan curah hujan diolah menjadi TMI berdasarkan Persamaan 1, 2, dan 3 berikut ini (Philp & Taylor, 2012).

$$P_{em}(t) = 1,65 \frac{P_{tm}(t)}{(T_m(t) + 12,1)^{1,1111}} \quad (1)$$

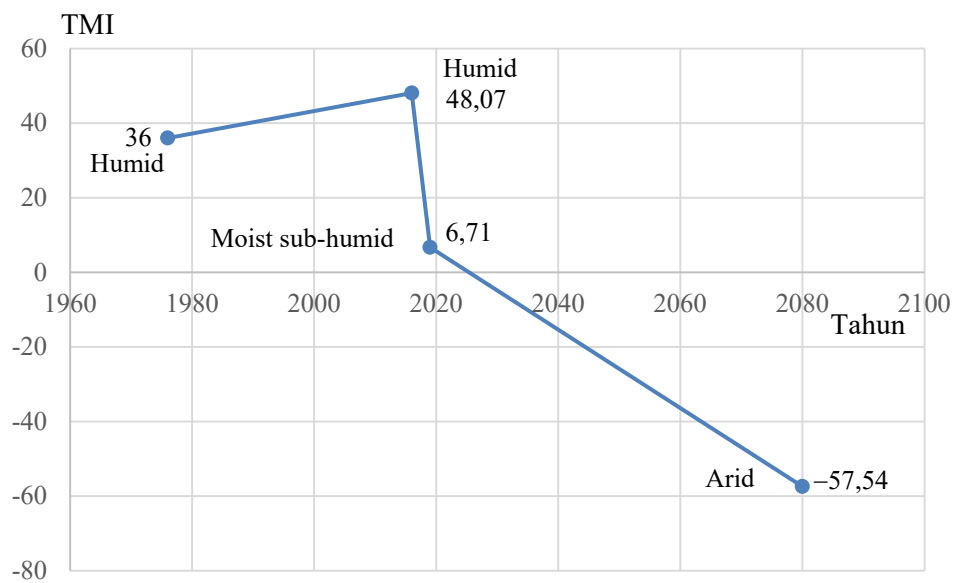
$$P_e(t) = \sum_{m=1}^{12} P_{em}(t) \quad (2)$$

$$TMI(t) \approx 1,25P_e(t) - 60 \quad (3)$$

Perhitungan nilai TMI tahun 2016 adalah sebagai berikut.

1. Suhu udara rerata dan curah hujan Januari 2016 masing-masing adalah 27,5°C dan 152 mm.
2. Nilai $P_{em}(t)$ Januari 2016 adalah $P_{em}(t) = 1,65 \frac{152}{(152+12,1)^{1,1111}} = 4,2$
3. Nilai-nilai $P_{em}(t)$ bulan-bulan lainnya pada tahun 2016 dihitung dengan cara yang sama dengan langkah nomor 2.
4. Nilai $P_e(t)$ tahun 2016 berdasarkan langkah nomor 3 adalah 86,46.
5. Nilai pendekatan TMI adalah $TMI(t) \approx 1,25 \cdot 86,46 - 60 = 48,07$.

Data historis TMI DIY tahun 1976 adalah 36 (Kyuma, 1971). Nilai TMI tahun 2019 dihitung berdasarkan suhu udara rerata DIY tahun 2016 sebesar 26,7°C dan curah hujan bulan rerata di 4 kabupaten D.I. Yogyakarta. Proyeksi nilai TMI dihitung berdasarkan proyeksi Bank Dunia terkait perubahan suhu udara dan curah hujan di Indonesia tahun 2080-an. Proyeksi kenaikan suhu udara adalah 0,3°C per dekade (The World Bank Group, 2011), sehingga suhu diprediksi meningkat dari 26,7°C menjadi $26,7 + (0,3 \times (\frac{2080-2016}{10})) = 28,6^\circ\text{C}$. Prediksi suhu udara rerata tersebut masih berada dalam selang persentil ke 10–90 proyeksi moderat suhu udara rerata di Indonesia tahun 2081 yang dipublikasikan dalam <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/indonesia/climate-data-projections> (2021), yaitu 27,22–28,6°C. Curah hujan tahunan rerata di wilayah selatan Indonesia (termasuk Pulau Jawa) menurun 15% (Case et al., 2007)(The World Bank Group, 2011), sehingga pada tahun 2080-an nilainya menurun dari 240,16 cm (rerata data tahun 2015–2019) menjadi 204,14 cm atau 2041,4 mm. Prediksi curah hujan tersebut masih berada dalam selang persentil ke 10–90 proyeksi moderat curah hujan tahunan di Indonesia periode 2080–2099 yang dipublikasikan dalam oleh Worldbank, yaitu 1909,9–4569,24 mm. Proyeksi moderat perubahan iklim, atau yang diistilahkan *Shared Socio-economic Pathway-2 4.5*, mengasumsikan bahwa emisi CO₂ tetap turun pada tahun 2050, tetapi tidak mencapai nol bersih pada tahun 2100. Gambar 1 menyajikan perubahan nilai TMI dan klasifikasi tipe iklim Thornthwaite tahun 1976, 2016, 2019, dan 2080.



Gambar 1. Perubahan Nilai TMI Dan Klasifikasi Tipe Iklim Thornthwaite

3.2. Penentuan Parameter Teknis Evaluasi Perkerasan Kaku Berdasarkan Manual Desain Perkerasan

Model empiris perhitungan jumlah kerusakan level 3 (parah) perkerasan kaku akibat *pumping* yang dikemukakan (Jung et al., 2009) setelah Rrauhut (1982) menggunakan beberapa variabel, termasuk masukan jumlah repetisi sumbu kendaraan berat dan tebal pelat beton perkerasan kaku. Studi ini menggunakan klasifikasi jumlah repetisi sumbu kendaraan berat dan tebal pelat beton tipikal perkerasan kaku standar di Indonesia, yaitu Bagan Desain 4 Perkerasan Kaku untuk Jalan dengan Beban Lalu Lintas Berat (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2017), seperti tersaji pada Tabel 4.

Tabel 4. Bagan Desain – 4 Perkerasan Kaku Untuk Jalan Dengan Beban Lalulintas Berat

Struktur Perkerasan	R1	R2	R3	R4	R5
Kelompok sumbu kendaraan berat (<i>overloaded</i>) (10^6)	< 4,3	< 8,6	< 25,8	< 43	< 86
Dowel dan bahu beton	Ya				
Struktur Perkerasan (mm)					
Tebal pelat beton	265	275	285	295	305
Lapis fondasi LMC	100				
Lapis drainase (dapat mengalir dengan baik)	150				

3.3. Model Empiris Kerusakan *Pumping Erosion* Perkerasan Kaku

Model umum kerusakan *pumping erosion* perkerasan kaku tanpa dan dengan tulangan menggunakan Persamaan 4 (Jung et al., 2009).

$$g = \left(\frac{ESAL}{\rho} \right)^\beta \quad (4)$$

dengan

g = jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping*.

Nilai-nilai variabel β dan ρ pelat beton perkerasan kaku tanpa tulangan dihitung berdasarkan Persamaan 5 dan 6 (Jung et al., 2009).

$$\ln \rho = 1,39 \times DRAIN + 4,13 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{0,772 \times (D - 2,3)^{1,61}}{PPTN} + 0,0157 \times JLTS \times D + 0,104 \times STAB + 0,17 \times DRAIN + 0,137 \times SOILTYP - 0,247 \quad (6)$$

dengan

$JLTS = 0$ (tanpa dowel); 1 (menggunakan dowel).

$DRAIN = 0$ (tanpa lapis drainase); 1 (dengan lapis drainase)

$PPTN$ = curah hujan tahunan rerata (mm).

D = tebal pelat beton perkerasan kaku (in).

$STAB = 0$ (LPB); 1 (LPB terstabilisasi).

$SOILTYP$ = tanah fondasi (*foundation soil*), yaitu 0 (untuk granular) atau 1 (kasar).

Nilai-nilai variabel β dan ρ pelat beton perkerasan kaku dengan tulangan dihitung berdasarkan Persamaan 7 dan 8 (Jung et al., 2009).

$$\ln \rho = 1,028 \times STAB + 0,0004966 \times D^{2,47} - 0,01248 \times FRINDEX + 1,667 \times CBR + 5,476 \quad (7)$$

$$\beta = -0,01363 \times TMI + 0,02527 \times D - 0,423 \quad (8)$$

dengan

$FRINDEX$ = *freezing index*.

CBR = CBR tanah dasar

Perhitungan g pelat beton perkerasan kaku tanpa dan dengan tulangan struktur dilaksanakan berdasarkan data iklim tahun 2015–2019 dan tahun 2080-an serta menggunakan lembar kerja excel™. Contoh perhitungan untuk struktur perkerasan R1 disajikan pada Tabel 5 dan Tabel 6. Masukan untuk perhitungan g struktur perkerasan R1 (pelat beton tanpa tulangan) adalah sebagai berikut.

1. $ESAL = 4300000$ kelompok sumbu kendaraan berat.
2. $DRAIN = 1$ karena R1 memiliki lapis drainase (dapat mengalir dengan baik) setebal 150 mm.
3. $PPTN = 240,16$ cm (untuk periode tahun 2015–2019) dan 204,14 cm untuk tahun 2080-an.
4. $D = 265$ mm yaitu tebal pelat beton untuk struktur perkerasan R1.
5. $JLTS = 1$ karena menggunakan dowel.
6. $STAB = 1$ karena menggunakan *lean mix concrete* (LMC) sebagai lapis pondasi.
7. $SOILTYP = 0$ karena tanah dasarnya lempung, yang merupakan tanah berbutir halus, bukan tanah berbutir kasar.

Masukan untuk perhitungan g struktur perkerasan R1 (pelat beton dengan tulangan) adalah sebagai berikut.

1. $ESAL = 4300000$ kelompok sumbu kendaraan berat.
2. $D = 265$ mm yaitu tebal pelat beton untuk struktur perkerasan R1.
3. $STAB = 1$ karena menggunakan *lean mix concrete* (LMC) sebagai lapis pondasi.
4. $FRINDEX$ atau *freezing index* = 0 karena Indonesia tidak memiliki musim dingin.

5. CBR = 6%, yaitu ketentuan nilai minimum CBR untuk struktur perkerasan dalam MDP 2017.

$TMI = 48,07$ (TMI yang dihitung berdasarkan data suhu rerata tahun 2016 dan rerata data curah hujan tahunan periode 2015-2019) dan $-57,43$ (prediksi TMI tahun 2080-an).

Tabel 5. Contoh Perhitungan Pumping Index Pelat Beton Perkerasan Kaku Tanpa Tulangan Struktur perkerasan kaku R1 (pelat beton tanpa tulangan)

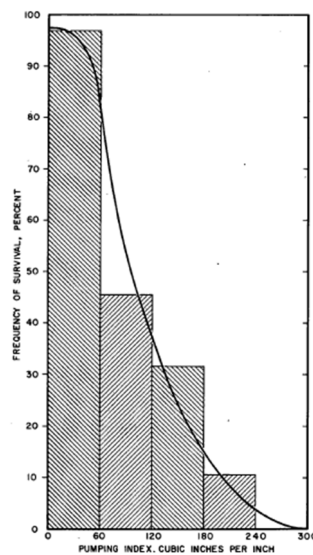
A. Berdasarkan curah hujan tahunan rerata 2015–2019				B. Berdasarkan prediksi curah hujan tahunan rerata 2080-an			
1	<i>ESAL</i>	4300000		<i>ESAL</i>	4300000		
	<i>DRAIN</i>	1		<i>DRAIN</i>	1		
	$\ln \rho = 1,39 \times DRAIN + 4,13$	5,52		$\ln \rho = 1,39 \times DRAIN + 4,13$	5,52		
2	ρ	249,64		ρ	249,64		
	<i>PPTN</i>	240,16	cm	$\Delta PPTN$	-15%		
	<i>PPTN</i>	240,16	cm	<i>PPTN</i>	204,14	cm	
	<i>D</i>	265	mm	<i>D</i>	265	mm	
		10,43	in		10,43	in	
3	$(0,772 \times (D - 2,3)^{1,61}) / PPTN$	0,094			0,110		
	<i>JLTS</i>	1		<i>JLTS</i>	1		
4	$0,0157 \times JLTS \times D$	0,164			0,164		
	<i>STAB</i>	1		<i>STAB</i>	1		
5	$0,104 \times STAB$	0,104			0,104		
6	$0,17 \times DRAIN$	0,17			0,17		
	<i>SOILTYP</i>	0		<i>SOILTYP</i>	0		
7	$0,137 \times SOILTYP$	0			0		
8		0,247			0,247		
9	$\beta = (3) + (4) + (5) + (6) + (7) - (8)$	0,285			0,301		
10	g	16,069	$\frac{in^3}{in}$ length	G	18,888	$\frac{in^3}{in}$ length	h
11	Persentase perubahan g akibat perubahan (unsur) iklim, yaitu <i>PPTN</i>					18%	
12	Kesimpulan perubahan (unsur) iklim mengakibatkan g naik						

Tabel 6. Contoh Perhitungan Pumping Index Pelat Beton Perkerasan Kaku Dengan Tulangan

A. Berdasarkan curah hujan tahunan rerata 2015–2019				B. Berdasarkan prediksi curah hujan tahunan rerata 2080-an			
1	<i>ESAL</i>	4300000		<i>ESAL</i>	4300000		
	<i>STAB</i>	1		<i>STAB</i>	1		
2	$1,028 \times STAB$	1,028			1,028		
	<i>D</i>	265	mm	<i>D</i>	265	mm	
		10,43	in		10,43	in	
3	$0,0004966 \times D \times 2,47$	0,163			0,16		
		10,43	in		10,43	in	
	<i>FRINDEX</i>	0		<i>FRINDEX</i>	0		
4	$0,01248 \times FRINDEX$	0			0		
	<i>CBR</i>	6		<i>CBR</i>	6		
5	$1,667 \times CBR$	10,002			10,002		
6		5,476			5,476		
7	$\ln \rho = (2) + (3) - (4) + (5) + (6)$	16,669			16,669		
					1734363		
8	ρ	17343639,8		ρ	9,8		
9	TMI	48,07		TMI	-57,54		
	$-0,01363 \times TMI$	-0,655			0,784		
10	$0,02527 \times D$	0,264			0,264		
11		0,423			0,423		
12	$\beta = (9) + (10) - (11)$	-0,815		β	0,625		

13	g	3,114	$\frac{in^3}{in}$ $length$	g	0,419	$\frac{in^3}{in}$ $length$
14	Persentase perubahan g akibat perubahan (unsur) iklim yaitu TMI				-87%	
15	Kesimpulan perubahan (unsur) iklim mengakibatkan g turun					

Standar tingkat keparahan kerusakan perkerasan lentur akibat *pumping* (g) belum ada. Penelitian ini mengkaji kemungkinan menggunakan hasil *The American Association of State Highway Officials* (AASHO) *road test* sebagai indikator jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping* (g). Data AASHO *road test* menunjukkan bahwa perkerasan kaku yang mengalami rusak berat (*severe*) dan memiliki *terminal serviceability index* (p_t) rendah (yaitu 1,5), memiliki *pumping index* rerata 134 in^3 per in *length* perkerasan kaku. *Pumping index* adalah volume material halus yang terangkat ke sambungan/tepi pelat beton, dan dinyatakan dalam satuan in^3 per in *length* perkerasan kaku. Gambar 2 menyajikan perkiraan peluang bahwa sebuah segmen uji (perkerasan kaku) dengan *pumping index* (tertentu) akan bertahan (terhadap) 1114000 repetisi beban sumbu (standar) (Highway Research Board, 1962). Pembacaan terhadap *survival curve* tersebut menghasilkan interpretasi bahwa peluang segmen perkerasan kaku dengan *pumping index* 134 in^3 per in *length* bertahan terhadap 1114000 repetisi beban sumbu standar adalah sekitar 30–35%. Peluang tersebut relatif rendah sehingga dianggap relevan, jika selanjutnya, penelitian ini mengelaborasi nilai *pumping index* sebesar 134 in^3 per in *length* perkerasan kaku sebagai kriteria dalam mengidentifikasi jumlah kerusakan level 3 (parah) akibat *pumping* (g). Elaborasi tersebut berdasarkan rujukan bahwa *pumping* material lapis fondasi atau tanah dasar dapat mengakibatkan terbentuknya rongga (*voids* atau *cavities*) di bawah pelat beton, sehingga perkerasan kaku kehilangan dukungan (*loss of support*) (Darter, M.I., Hall, K.T., Kuo, 1995).



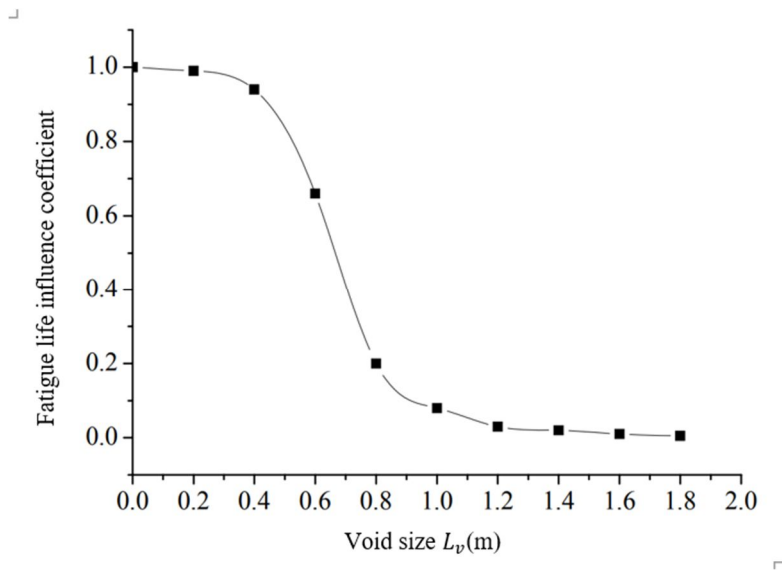
Gambar 2. Kurva Perkiraan Peluang Bahwa Sebuah Segmen Uji (Perkerasan Kaku) Dengan *Pumping Index* (Tertentu) Akan Bertahan (Terhadap) 1114000 Repetisi Beban Sumbu (Standar) (Highway Research Board, 1962)

3.4. Analisis Kehilangan Dukungan (*Loss of Support*) Perkerasan Kaku

Kehilangan dukungan (*loss of support*) adalah celah atau ruang kosong antara pelat beton perkerasan kaku dan lapis dibawahnya (lapis fondasi atau tanah dasar) yang menyebabkan lendutan pelat beton meningkat. Ada tiga tipe dasar kehilangan dukungan, yaitu *pumping* material lapis fondasi atau tanah dasar, penurunan atau konsolidasi tanah dasar, serta

pelengkungan pelat beton akibat perbedaan suhu dan perubahan kelembaban (Darter, M.I., Hall, K.T., Kuo, 1995).

Pumping mengakibatkan terbentuknya rongga di bawah pelat beton perkerasan kaku, terutama di area sekitar sudut pelat beton (*slab corner voids*). Rongga yang terbentuk dapat diidealisasikan berbentuk segitiga siku-siku sama kaki (*isosceles triangle*) (Zeng & Xu, 2009) atau persegi (Bhatti et al., 1996) (Zhang, Tao; Ren, 2019). *Slab corner voids* dengan sisi < 0,4 m diklasifikasikan berukuran normal (Zhang, Tao; Ren, 2019), dan tidak berdampak signifikan terhadap pengurangan umur lelah pelat beton (Zeng & Xu, 2009). Namun, *slab corner voids* dengan sisi > 0,7 m mengakibatkan umur rencana perkerasan kaku berkurang secara drastis. Gambar 3 menunjukkan bahwa *slab corner voids* dengan sisi = 0,7 m memiliki koefisien umur lelah 0,3. Hal tersebut berarti, umur teknisnya turun 70% menjadi 30% dari umur rencana.



Gambar 3. Hubungan Antara Koefisien Pengaruh Umur Lelah Dan Ukuran Rongga Rongga Di Bawah Pelat Beton (Zeng & Xu, 2009)

Analisis berikut mengkaji hubungan antara *pumping index* sebesar 134 in³ per in *length* perkerasan kaku dan idealisasi ukuran rongga di bawah pelat beton perkerasan kaku yang bersisi 0,7 m. Secara kasar, perbandingan antara volume material *pumping* dan luasan bidang *pumping* menghasilkan informasi kedalaman rongga (*void depth*) rerata. Analisis pendekatan nilai *void depth* dilaksanakan sebagai berikut.

1. (Zeng & Xu, 2009) mengidealisasikan penampang rongga berbentuk segitiga siku-siku sama kaki (*isosceles triangle*). Untuk sisi berukuran 0,7 m diperoleh luasan $0,5 \times 0,7 \times 0,7 = 0,245 \text{ m}^2$. Dengan demikian, pendekatan nilai *void depth* adalah $(134 \text{ in}^3 \times 0,00064516) \div 0,245 = 0,352 \text{ m} = 35,2 \text{ cm}$.
2. (Zhang, Tao; Ren, 2019) mengidealisasikan penampang rongga berbentuk persegi. Untuk sisi berukuran 0,7 m diperoleh luasan $0,7 \times 0,7 = 0,49 \text{ m}^2$. Dengan demikian, pendekatan nilai *void depth* adalah $(134 \text{ in}^3 \times 0,00064516) \div 0,49 = 0,176 \text{ m} = 17,6 \text{ cm}$.
3. (Bhatti et al., 1996) mengidealisasikan penampang rongga berbentuk persegi panjang dan membagi tiga zonasi *pumping* sesuai AASHTO 1993. Zona I paling dekat dengan area sekitar sudut pelat beton (*slab corner voids*) memiliki luasan $(3 \times 4,25) \text{ ft}^2 \times 0,092903 = 1,185 \text{ m}^2$. Dengan demikian, pendekatan nilai *void depth* untuk zona I adalah $(134 \text{ in}^3 \times 0,00064516) \div 1,184 = 0,073 \text{ m} = 7,3 \text{ cm}$.

(Kovacs & Morey, 1983) melaksanakan penelitian deteksi rongga (*cavities*) di bawah pelat beton perkerasan kaku bandar udara. Hasilnya menunjukkan rentang kedalaman rongga (*void depth*) adalah 1–23 in atau 2,54 – 58,42 cm. (Xie et al., 2021) menyajikan data hasil pengamatan rongga (*cavities*) di bawah pelat beton perkerasan kaku menggunakan *Ground Penetrating Radar*. Hasil yang diperoleh berada dalam rentang kedalaman rongga (*void depth*) adalah 13–111 cm. Dengan demikian, hasil analisis pendekatan nilai *void depth* yang diperoleh masih berada dalam rentang hasil lapangan studi-studi terdahulu. (Liu et al., 2020) menyatakan bahwa celah ≥ 5 cm (persis) di bawah pelat beton mengakibatkan pelat beton dan lapis fondasi tidak saling kontak meskipun pelat beton dibebani lalu lintas dan melendut. Tanpa kontak antara pelat beton dan lapis fondasi, perkerasan kaku dapat mengalami kehilangan dukungan (*loss of support*). Sesuai hasil analisis sebelumnya, *pumping index* 134 in³ per in *length* dimungkinkan memiliki variasi *void depths* > 5 cm, sehingga pada *pumping index* ≥ 134 in³ per in *length* perkerasan kaku beresiko kehilangan dukungan (*loss of support*).

3.5. Kompilasi Hasil Analisis Potensi Kerusakan Pelat Beton Perkerasan Kaku Akibat Perubahan Iklim

Studi ini menganalisis lima tipe perkerasan kaku (R1-R5) yang terdapat dalam Bagan Desain 4 Perkerasan Kaku untuk Jalan dengan Beban Lalu Lintas MDP 2017 sebagai obyek studi. Tabel 7 menyajikan kompilasi hasil perhitungannya yang proses perhitungan dilaksanakan sesuai contoh pada Tabel 5 dan Tabel 6, serta klasifikasi dampak perubahan iklim terhadap perkerasan kaku, dikaitkan dengan potensi kerusakan kehilangan dukungan (*loss of support*).

Tabel 7. Kompilasi Hasil Analisis Potensi Kerusakan Pelat Beton Perkerasan Kaku

Parameter	Tipe perkerasan kaku				
	R1	R2	R3	R4	R5
Perkerasan kaku menggunakan pelat beton tanpa tulangan					
<i>g</i> berdasarkan kondisi iklim 2015–2019	16,07 (< 134)	22,56 (< 134)	36,73 (< 134)	51,02 (< 134)	76,69 (< 134)
<i>g</i> berdasarkan perkiraan kondisi iklim 2080-an	18,89 (< 134)	27,20 (< 134)	45,86 (< 134)	65,41 (< 134)	101,56 (< 134)
Δg	18%	21%	25%	28%	32%
Klasifikasi dampak perubahan iklim	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>
Perkerasan kaku menggunakan pelat beton dengan tulangan					
<i>g</i> berdasarkan kondisi iklim 2015–2019	3,11 (< 134)	1,78 (< 134)	0,75 (< 134)	0,51 (< 134)	0,31 (< 134)
<i>g</i> berdasarkan perkiraan kondisi iklim 2080-an	0,42 (< 134)	0,64 (< 134)	1,27 (< 134)	1,76 (< 134)	2,77 (< 134)
Δg	– 87%	– 64%	69%	244%	807%
Klasifikasi dampak perubahan iklim	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>	Terdampak, tetapi tidak mengalami <i>loss of support</i>

Tabel 7 menyajikan hasil studi sebagai berikut.

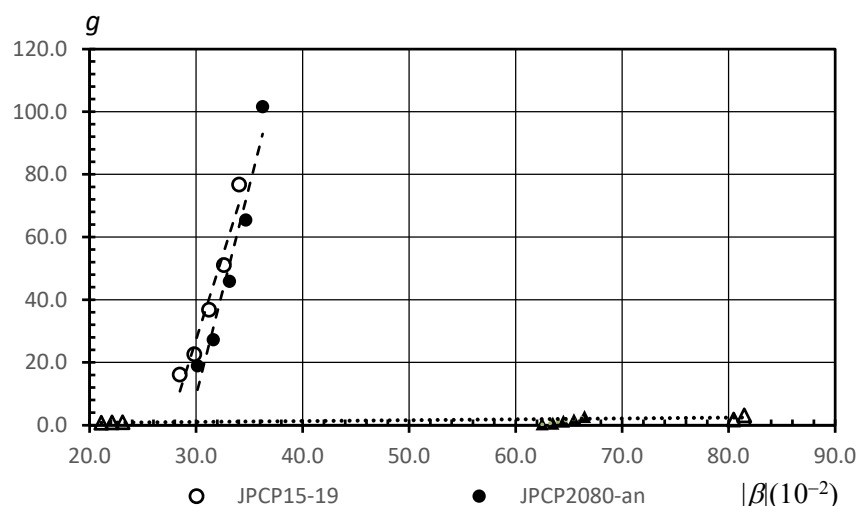
1. Perubahan iklim berpotensi meningkatkan *pumping* perkerasan kaku tanpa tulangan antara 18–32%.

2. Kerusakan pumping pada perkerasan kaku tanpa tulangan lebih besar dari perkerasan kaku dengan tulangan.
3. Lima tipikal perkerasan kaku standar di Indonesia (R1-R5) memiliki $g < 134 \text{ in}^3$ per in panjang, sehingga perubahan iklim diperkirakan tidak mengakibatkan kehilangan dukungan (*loss of support*) perkerasan kaku.

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa

1. Ada tiga seri data yang konsisten menunjukkan kenaikan nilai-nilai g , yaitu perkerasan kaku tanpa tulangan (periode tahun 2015-2019) dan perkerasan kaku dengan tulangan periode 2080-an. Karakteristik tersebut dipengaruhi oleh variabel β yang dihitung berdasarkan Persamaan 6 (untuk perkerasan kaku tanpa tulangan) atau Persamaan 8 (untuk perkerasan kaku dengan tulangan). Nilai variabel β ketiga seri data tersebut seluruhnya positif. Oleh karena itu, pemodelan *pumping erosion* pada perkerasan kaku tanpa tulangan (periode tahun 2015-2019) dan perkerasan kaku dengan tulangan periode 2080-an akibat perubahan unsur iklim, yaitu curah hujan (*PPTN*) dan *TMI*, secara konsisten meningkatkan nilai g seiring dengan peningkatan repetisi lalu lintas.
2. Nilai-nilai g perkerasan kaku dengan tulangan periode tahun 2015-2019 justru menurun. Hubungan tersebut juga masih terkait dengan variabel β yang dihitung menggunakan Persamaan 8. Nilai *TMI* pada periode 2015-2109 bernilai positif sehingga model menghasilkan nilai β yang negatif. Oleh karena itu, pemodelan *pumping erosion* pada perkerasan kaku dengan tulangan (periode tahun 2015-2019) menurunkan nilai g meskipun lalulintasnya meningkat.

Penelitian ini mengkaji hubungan antara nilai mutlak β dengan g , seperti disajikan pada Gambar 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa perkerasan kaku dengan tulangan (*Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP*) menunjukkan hubungan β - g yang kemiringannya landai. Sebaliknya, perkerasan kaku tanpa tulangan (*Jointed Plain Concrete Pavement, JPCP*) menunjukkan hubungan β - g yang kemiringannya curam. Hal tersebut merupakan indikasi awal bahwa perkerasan kaku tanpa tulangan lebih mudah mengalami *pumping erosion* akibat perubahan iklim daripada perkerasan kaku dengan tulangan.



Gambar 4. Hubungan Antara Nilai Mutlak β (10^{-2}) Dengan Nilai g

4. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Nilai-nilai *TMI* pada tahun 1976, 2016, 2019, dan 2080 adalah 36; 48,07; 6,71; dan -57,43. Perubahan nilai-nilai *TMI* mengindikasikan terjadinya perubahan iklim.
2. *Pumping index* sebesar $= 134 \text{ in}^3$ per in *length* dapat menghasilkan variasi *void depths* > 5 cm, sehingga pada *pumping index* ≥ 134 perkerasan kaku beresiko kehilangan dukungan (*loss of support*).
3. Perubahan iklim berpotensi meningkatkan *pumping* perkerasan kaku tanpa tulangan antara 18-32%.
4. Lima tipe perkerasan kaku (R1-R5) yang terdapat MDP 2017 memiliki *pumping index* atau $g < 134 \text{ in}^3$ per in panjang, sehingga perubahan iklim diperkirakan tidak mengakibatkan kehilangan dukungan (*loss of support*) perkerasan kaku.
5. Perkerasan kaku tanpa tulangan terindikasi lebih mudah mengalami *pumping erosion* akibat perubahan iklim daripada perkerasan kaku dengan tulangan.

Penelitian ini menggunakan model empiris *pumping erosion* (Jung et al., 2009). Variabel-variabelnya terbatas menjelaskan perkerasan kakunya saja, tetapi belum menjelaskan hubungan perubahan iklim dengan kondisi tanah lempungnya. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan model perilaku perkerasan kaku yang variabelnya lebih lengkap, termasuk variabel yang menghubungkan perubahan iklim dengan kondisi tanah lempungnya, salah satunya menggunakan model rasional yang dikembangkan oleh (Hong et al., 2006).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai dengan Dana Masyarakat Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada tahun 2021. Para penulis menyampaikan terima kasih kepada segenap pihak yang membantu terselenggaranya kegiatan penelitian, khususnya dari kalangan sivitas akademika Departemen Teknik Sipil SV UGM.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhatti, M. A., Barlow, J. A., & Stoner, J. W. (1996). Modeling damage to rigid pavements caused by subgrade pumping. *Journal of Transportation Engineering*, 122(1), 12–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1996\)122:1\(12\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1996)122:1(12))
- Case, M., Ardiansyah, F., & Spector, E. (2007). Climate Change in Indonesia Implications for Humans and Nature. *Energy*, 1–13.
- Christodoulis, J. (2015). Engineering Properties and Shrinkage Limit of Swelling Soils in Greece. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 06(05), 6–11. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000279>
- Darter, M.I., Hall, K.T., Kuo, C. M. (1995). *Support Under Portland Cement Concrete Pavements is*. National Academy Press.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2011). *PANDUAN PEMILIHAN TEKNOLOGI PEMELIHARAAN PREVENTIF PERKERASAN JALAN*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). *Manual Desain Perkerasan Jalan*. 239.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Suplemen Manual Desain Perkerasan Jalan 2017*.
- Giovanni, S., Mochtar, I. B., & Endah, N. (2018). Usulan Penyelesaian Masalah Rekayasa Tanah untuk Jalan dan Gedung di Atas Tanah Ekspansif Studi Kasus Surabaya Barat. In *Jurnal Teknik ITS* (Vol. 7, Issue 1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v7i1.28980>
- Highway Research Board. (1962). *The AASHO Road Test Report 5 Pavement Research, Special Report 61 E*.
- Hong, G. T., Bulut, R., Aubeny, C. P., Jayatilaka, R., & Lytton, R. L. (2006). Design model for roughness and serviceability of pavements on expansive soils. *Transportation Research Record*, 1967, 103–111.

- <https://doi.org/10.1177/0361198106196700111>
- Huizinga, J., de Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions. In *Joint Research Centre (JRC)*. <https://doi.org/10.2760/16510>
- Jung, Y. su, Zollinger, D. G., Won, M., & ... (2009). Subbase and subgrade performance investigation for concrete pavement. In ... *Rep. No. FHWA/TX-09/0 ...*
- Kovacs, A., & Morey, R. M. (1983). DETECTION OF CAVITIES UNDER CONCRETE PAVEMENT. *CRREL Report (US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory)*, 25.
- Kyuma, K. (1971). Climate of South and Southeast Asia according to Thornthwaite's Classification Scheme. *The Southeast Asian Studies*, 9(1), 136–158.
- Liu, B., Zhou, Y., Gu, L., & Huang, X. (2020). Finite element simulation and multi-factor stress prediction model for cement concrete pavement considering void under slab. *Materials*, 13(22), 7. <https://doi.org/10.3390/ma13225294>
- Muntohar, A. S. (2006). THE SWELLING OF EXPANSIVE SUBGRADE AT WATES-PURWOREJO ROADWAY STA. 8 127. *Civil Engineering Dimension*, 8(2), 106–110.
- Philp, M., & Taylor, M. (2012). *Beyond Agriculture: Exploring the application of the Thornthwaite Moisture Index to infrastructure and possibilities for climate change adaptation infrastructure and possibilities for climate change adaptation*. October, 21.
- Roesler, J.R., Hiller, J.E., Brand, A. S. (2016). *Continuously Reinforced Concrete Pavement Manual Guidelines for Design, Construction, Maintenance, and Rehabilitation*. Federal Highway Administration.
- Suherman. (2005). Potensi Sifat Ekspansif Tanah Kelempungan. *Jurnal Jalan Dan Jembatan*, 7.
- The World Bank Group. (2011). *Vulnerability, Risk Reduction, and Adaptation to Climate Change*.
- van de Lindt, J. W., & Taggart, M. (2009). Fragility Analysis Methodology for Performance-Based Analysis of Wood-Frame Buildings for Flood. *Natural Hazards Review*, 10(3), 113–123. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1527-6988\(2009\)10:3\(113\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2009)10:3(113))
- Wen, L., Zhu, G. X., & Baozhu. (2017). Cause Analysis on the Void under Slabs of Cement Concrete Pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 205(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/205/1/012011>
- Xie, J., Niu, F., Su, W., Huang, Y., & Liu, G. (2021). Identifying airport runway pavement diseases using complex signal analysis in GPR post-processing. *Journal of Applied Geophysics*, 192, 3. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104396>
- Zeng, S., & Xu, J. (2009). Voids classification standard for cement concrete pavement slabs based on service life. *Proceedings of the 9th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation System Planning, Development, and Management*, 358, 569–574. [https://doi.org/10.1061/41064\(358\)80](https://doi.org/10.1061/41064(358)80)
- Zhang, Tao; Ren, Y. (2019). Identification and detection of a void under highway cement concrete pavement slabs based on finite element analysis. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*, 44. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.5>