

# Penilaian *Bridge Condition Index* WSDOT dan Model Deteriorasi *Weibull Distribution Function* Berbasis Reabilitas (Studi Kasus: Tiga Jembatan *PC-I Girder* di Tol Solo-Ngawi)

Maulida Amalia Rizki<sup>1,\*</sup>, Akhmad Aminullah<sup>2</sup>, dan Ali Awaludin<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: maulida.amalia1893@ugm.ac.id

## INTISARI

*Bridge Condition Index Western Australia Department of Transportation* (BCI WSDOT) dikembangkan untuk mengevaluasi suatu kondisi struktur jembatan. Sistem Manajemen Jembatan yang dilengkapi dengan model deteriorasi yang andal dapat membantu perencanaan pemeliharaan dan rehabilitasi. Fungsi Distribusi Weibull (WDF) dapat mewakili probabilitas waktu kegagalan pada komponen selama masa layan akan dikembangkan dalam penelitian ini untuk membuat persamaan empiris penurunan kondisi yang berkaitan dengan umur jembatan. Hasil penelitian menunjukkan kondisi jembatan pada periode tahun yang spesifik yaitu pada USL yang merupakan ambang batas untuk tingkat fungsional dan keamanan, kurva kerusakan ini diplot berdasarkan umur rencana jembatan pedoman persyaratan umum persyaratan umum jembatan 2015 yaitu 75 th. UDC pada kasus yang disajikan menunjukkan bahwa setelah dilakukan inspeksi, jembatan diperkirakan mencapai akhir umur layannya pada tahun ke-54 yaitu pada 2064. Selanjutnya PDC merencanakan tindakan perbaikan dan rehabilitasi yang dilakukan pada saat kondisi reabilitas 60% atau pada tahun ke-43 yaitu pada 2053, sehingga kondisi reabilitas terintegrasi setelah tindakan rehabilitasi ( $CR_{IR}$ ) dapat kembali sesuai umur rencana. Kelebihan penggunaan metode BCI WSDOT dalam penilaian jembatan adalah memiliki kondisi peringkat setiap komponen struktural yang detail berdasarkan sensitifitas kerusakannya, serta WDF merupakan model terbaik untuk kurva siklus hidup jembatan dengan data inspeksi yang terbatas.

**Kata kunci:** Inspeksi Visual, Jembatan, Distribusi Weibull, Reabilitas.

## 1 PENDAHULUAN

Peranan penting jembatan harus didukung oleh pengelolaan yang baik dari sisi pemeliharaan, perbaikan dan penggantian selama siklus hidup jembatan berlangsung. Guna mendukung pengamanan sistem jaringan jalan dan jembatan secara komprehensif, yang kaitannya dengan pemeliharaan dan perbaikan selama masa layan. Model deteriorasi/penurunan kondisi suatu jembatan adalah suatu masukan yang sangat penting untuk mengoptimalkan proses manajemen jembatan. Kobayashi (2010), Sobanjo (2010) dan Alsharqawi (2018) menyatakan Fungsi Distribusi Weibull (WDF) merupakan fungsi terbaik untuk mewakili model kurva siklus hidup jembatan dengan data inspeksi yang terbatas. Dengan index jembatan BCI yang dinyatakan dalam angka 100% sampai dengan 0% dapat dikembangkan untuk menentukan model deteriorasi jembatan, yaitu hubungan antara nilai kondisi dengan umur jembatan. Fungsi Weibull dapat digunakan untuk memprediksi kinerja siklus hidup sebuah struktur dengan memberikan asumsi kondisi batas alami. Kurva kondisi maksimum (100%) pada atau awal masa pakai, kurva kondisi mendekati keadaan minimum (0%) secara asimtotik, kondisi elemen memburuk dan kondisinya turun keandalan menurun. Manajemen dan perawatan jembatan adalah sangat penting untuk menjamin jembatan layak dan layan untuk melayani lalu-lintas di atas jembatan. Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui model deteriorasi, baik secara keseluruhan jembatan maupun elemen-elemennya, sehingga dapat merencanakan penanganan yang tepat berdasarkan prediksi kondisi jembatan agar jembatan selalu berada dalam kondisi aman, nyaman dan berfungsi selama umur rencana sehingga strategi manajemen jembatan yang efektif dapat dilaksanakan dengan efisien.

2 METODE

2.1 Penilaian Kondisi Jembatan dengan *Bridge Condition Index* WSDOT

Menurut pedoman *Detailed Visual Bridge Inspection Guidelines for Concrete and Steel Bridges* tahun 2017, *Bridge Condition Index* (BCI) merupakan nilai numerik yang dipakai oleh *Western Australia Department of Transportation* (WSDOT) untuk mengevaluasi kondisi keseluruhan jembatan. BCI menggunakan algoritma yang menggabungkan peringkat kondisi 1 sampai 4 untuk komponen struktural dan faktor bobot yang menggambarkan tingkat kepentingan dan kerusakan. Komponen struktur BCI WSDOT tercantum dalam tabel 1.

Tabel 1. Pembobotan Komponen Jembatan.

Grup Komponen	Nama Komponen	Bobot
1	Pelat	11
	Gelagar	
	Girder Box	
	Kolom, Pile	
	Kepala balok, Kepala Tiang	
	Pengaku Eksternal	
	Tiang, Kabel/Gantung	
2	Rangka	6
	Dinding	
	Pondasi	
	Diafragma	
	Bantalan	
3	Ikatan angin, Ikatan Balok, Baut	3
	Siar Muai	
	Dinding Belakang, Dinding Sayap	

Penilaian jembatan berdasarkan peringkat kondisi dalam perhitungan Index jembatan WSDOT adalah:

1. *Condition State Averaging* (CSA)

CSA adalah nilai pada setiap komponen berdasarkan peringkat kondisi dirata-rata.

$$CS(x) = \sum_{i=1}^n \frac{CS(x)}{n} \tag{1}$$

Dimana CS adalah *Condition State* (Peringkat Kondisi), dan n merupakan jumlah komponen.

2. *Weighted Component Score* (WCS)

$$WCS = GM \cdot \sum_{i=1}^4 CS_i \cdot CW_i \tag{2}$$

Dimana WCS adalah Skor Bobot Komponen, dan CW adalah *Condition Weight* (Bobot Kondisi)

3. *The Weighted Score* (WS)

$$WS = \frac{\sum_{i=1}^n WCS}{\sum_{i=1}^n GM_i} \tag{3}$$

Dimana GM adalah *Group Multiplier* (Grup Pengali)

Tabel 2 Skala Konversi Rentang Skor Bobot ke Rentang BCI

Rentang BCI	Keterangan	Rentang Skor Bobot	Skala Persamaan
0 – 19	Sangat Baik	100 - 160	BCI = (WS – 100) ÷ 3
20 – 39	Baik	161- 500	BCI = (WS + 180) ÷ 17
40 – 55	Sedang	501 - 660	BCI = (WS – 100) ÷ 10
56 – 100	Buruk	600 – 2.000	BCI = (9 x WS + 9,068) ÷ 268
101 – 200	Rusak Berat	2000 – 5.000	BCI = (0.033 x WS + 35)

## 2.2 Perkiraan Umur Layan

IBMS (*Interurban Bridge Management System*) menerapkan suatu rumus dalam keperluan analisa prediksi umur layan jembatan. Asumsi jembatan mempunyai umur rencana  $n$  tahun. Jembatan pada tahun ke- $n$  akan mengalami kerusakan terburuk.

$$EA = \frac{(100-a(5-CM))^b}{100} \times \text{umur rencana} \quad (4)$$

Dimana  $CM$  adalah *Condition Mark* (Nilai Kondisi),  $EA$  adalah *Equivalent of Age*,  $a$  adalah koefisien dengan nilai 4,66, dan  $b$  adalah koefisien dengan nilai 1,9051.

## 2.3 Model Deteriorasi *Weibull Distribution Function* (WDF)

Alsharqawi (2018) memodelkan proses deteriorasi berbasis rehabilitas untuk mengembangkan kurva kerusakan ideal, terkini, dan diprediksi, yang menggambarkan prediksi kinerja dek jembatan selama masa layannya.

### 1. *Ideal Deterioration Curve* (IDC)

IDC adalah kurva deteriorasi ideal komponen dari waktu ke waktu. IDC berkaitan dengan kondisi fisik struktur atau elemen, yang menunjukkan status kinerja strukturalnya.

$$CR_I^{IDC}(t) = a \times e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (5)$$

Dimana  $CR_I^{IDC}$  adalah komponen keandalan kondisi terintegrasi dari IDC pada periode waktu,  $\beta$  adalah *shape/slope parameter* dengan nilai lebih besar dari 0,  $\alpha$  adalah parameter untuk mencerminkan faktor kerusakan yang dipercepat, dan  $t$  adalah waktu.

### 2. *Updated Deterioration Curve* (UDC)

UDC adalah pembaharuan IDC dengan kurva baru, setelah mengevaluasi kondisi elemen pada saat inspeksi. IDC menggambar kurva penurunan teoretis yang diinginkan. UDC adalah representasi nyata dari kerusakan komponen dari waktu ke waktu.

$$CR_I^{UDC}(t) = 1 \times e^{\ln(CR_{Ii})(t/t_i)^3} \quad (6)$$

Dimana  $CR_I^{UDC}$  adalah : Komponen keandalan kondisi setelah pemeriksaan,  $CR_{Ii}$  adalah Keandalan kondisi terintegrasi, dan  $t_i$  adalah waktu inspeksi.

### 3. *Predicted Deterioration Curve* (PDC)

PDC adalah kurva prediksi kondisi terintegrasi masa depan dan masa manfaat baru (diperkirakan *Useful Service Life*) dengan mempertimbangkan riwayat inspeksi komponen. Dalam penelitian ini, keandalan kondisi terintegrasi sebelum dilakukan rehabilitasi.

$$CR_I^{PDC}(t) = CR_{IR} \times e^{\left[\frac{\ln(CR_{Ii}) \times (t - t_r + t_i^3)}{t_i^3}\right]} \quad (7)$$

Dimana  $CR_I^{PDC}$  adalah peningkatan kondisi terintegrasi langsung setelah tindakan rehabilitasi,  $t_r$  adalah waktu inspeksi, dan  $t_i$ : waktu pemeriksaan setelah tindakan rehabilitasi

## 3 HASIL PENELITIAN

### 3.1. Penilaian Kondisi Jembatan

Dari hasil penilaian kondisi tiga jembatan di ruas tol Solo-Ngawi. Nilai kondisi jembatan dapat digunakan sebagai variabel dalam perhitungan umur jembatan. Berikut ini perhitungan perkiraan umur jembatan secara manual. Dengan mengetahui index kondisi dengan menggunakan Persamaan (4) dapat diperoleh perkiraan sisa umur layan dan disajikan pada tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Perhitungan Nilai Kondisi.

Nama Jembatan	Kondisi Index	Kondisi	Perkiraan Umur Ekivalen	Perkiraan Umur Layan	Tahun Perkiraan CI = 100%
Gondangrejo	16,360 %	Sangat Baik	22 Tahun	53 Tahun	2067
Bengawan Solo	16,112 %	Baik	21 Tahun	54 Tahun	2064
Grompol	20,975 %	Baik	27 Tahun	48 Tahun	2066

3.2. Model Deteriorasi Jembatan

1. *Ideal Deterioration Curve (IDC)*

Dengan menggunakan Persamaan (5) dan mengetahui tahun pembangunan dari masing jembatan-jembatan di ruas jalan Tol Solo-Ngawi. IDC dapat digambarkan pada Gambar 3.A dengan menggunakan parameter menurut Alsharqawi (2018):

- a. Pada saat  $t = 0$  (waktu awal), kemiringan kurva deteriorasi sama dengan nol.
- b. *Service Life (SL)* yang ideal adalah 75 tahun berdasarkan Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan (2015).
- c. *Useful Service Life (USL)* diasumsikan 40% (kondisi buruk), di mana umur struktur berada pada tingkat minimum yang dapat diterima
- d. *Minimum Service Life (MSL)* diasumsikan 20% (status kritis)
- e. Tingkat kegagalan didefinisikan sebagai  $1/$  atau kebalikan dari parameter penyesuaian masa pakai
- f. Kurva deteriorasi yang ideal harus melalui suatu titik belok dan kemudian menurun tajam sehingga sesuai dengan tren deteriorasi jembatan.
- g. Parameter penurunan nilai harus lebih dari 1 ( $>1$ ) dan bilangan bulat = 3

- Pada saat  $t=0$ ,  $CR_I^{IDC}=100%$  atau 1 (kondisi maksimum), sehingga:
 
$$1 = a \times e^{-(0/\beta)} = a, \text{ sehingga } a = 1 \tag{7}$$
- Pada saat  $t=0$ , slope atau tangen=0, sehingga:
- Pada saat  $SL=75$  tahun,  $CR_I^{IDC}=20%$  (*minimum service life*), sehingga:

$$0.2 = 1 \times e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}, \text{ maka}$$

$$\ln(0.2) = \ln(1) - (75/\beta)^\alpha, \text{ dan}$$

$$\ln(1) - \ln(0.2) = 0 - \ln(0.2) = -\ln(0.2) = (75/\beta)^\alpha$$

Maka  $\beta$  didefinisikan menjadi Persamaan (8)

$$\beta = \frac{75}{[-\ln(0.2)]^{1/\alpha}} = \frac{75}{\alpha \sqrt[-\ln(0.2)]{}} \tag{8}$$

$$\beta = 64 \text{ tahun (nilai } \alpha = 3)$$

- Pada saat  $t=USL$ ,  $CR_I^{IDC}=40%$  (*useful service life*), dengan mensubstitusikan Persamaan (5). Sehingga  $CR_I^{IDC}$  dapat dihitung menggunakan persamaan (9).

$$CR_I^{IDC}(t) = 1 \times e^{-\left(\frac{t}{64}\right)^3} \tag{9}$$

Dimana  $CR_I$  merupakan komponen terintegrasi keandalan IDC di waktu  $t$ .

2. *Updated Deterioration Curve (UDC)*

- Pada saat inspeksi ( $t_i$ ), nilai kondisi reabilitas terintegrasi ( $CR_{Ii}$ ) adalah antara 1 dan 0.4, maka jika

$$CR_{Ii} = 1 \times e^{-\left(\frac{t_i}{\beta}\right)^\alpha}, \text{ maka}$$

$$\ln(CR_{Ii}) = \ln(1) - (t_i/\beta)^\alpha, \text{ maka}$$

$$\ln(1) - \ln CR_{Ii} = 0 - \ln CR_{Ii} = -\ln CR_{Ii} = (t_i/\beta)^\alpha, \text{ sehingga:}$$

$\beta$  didapatkan dengan persamaan (10) sehingga:

$$\beta = \frac{t_i}{[-\ln(CR_{Ii})]^{1/\alpha}} = \frac{t_i}{\alpha \sqrt[-\ln(CR_{Ii})]}} \tag{10}$$

Dimana  $CR_{Ii}$  adalah kondisi rehabilitas terintegrasi pada waktu  $t_i$ ; dan  $t_i$  adalah waktu inspeksi. Dengan menghitung persamaan (11) dan substitusi ke Persamaan (6), maka  $CR_I^{UDC}$  dapat dihitung dengan Persamaan (11)

$$CR_I^{UDC}(t) = 1 \times e^{\left[ \frac{\ln(CR_{Ii})x t^3}{t_i^3} \right]} \tag{11}$$

Berdasarkan persamaan (11), menggunakan ( $t_i$ ) waktu inspeksi yaitu pada saat umur jembatan 11 tahun dengan mengambil nilai  $CR_{Ii}$  70%. Maka,  $CR_I^{UDC}$  didefinisikan dalam Persamaan (12).

$$CR_I^{UDC}(t) = 1 \times e^{\ln(CR_{Ii})(t/t_i)^3} \tag{12}$$

Sehingga didapatkan nilai SL UDC yaitu 53,21 ~ 53 tahun dan USL UDC yaitu 45,402 ~ 46 tahun.

3. Predicted Deterioration Curve (PDC)

$CR_I^{PDC}$  dapat dihitung dengan Persamaan (13)

$$CR_I^{PDC}(t) = 1 \times e^{\ln(CR_{Ir})(t/tr)^3} \tag{13}$$

Dimana  $CR_{Ir}$  adalah keandalan kondisi terintegrasi langsung sebelum tindakan rehabilitasi; dan  $tr$  adalah waktu tindakan rehabilitasi. Pada bagian setelah rehabilitasi (pada  $t_r+1$ ), bentuk PDC tetap sama dengan fungsi UPC, perbedaannya adalah pada  $tr+1$  keandalan kondisi terintegrasi sama dengan nilai kondisi yang ditingkatkan sebagaimana didefinisikan dalam Persamaan (14):

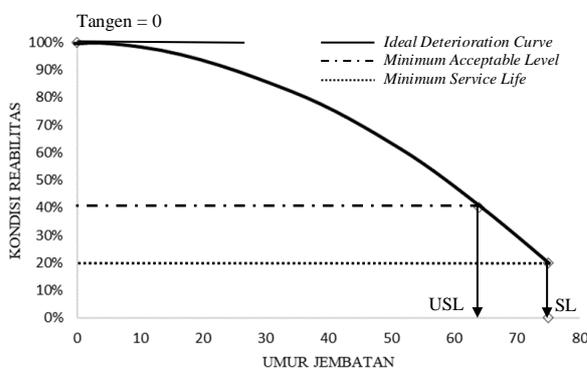
$$CR_{IR} = CR_{IR} + \Delta R \tag{14}$$

$\Delta R$  adalah tindakan rehabilitasi. Dengan mengganti dalam Persamaan. (13), PDC untuk keandalan kondisi terintegrasi setelah tindakan rehabilitasi  $CR_I^{PDC}$  dapat dihitung menggunakan Persamaan (15):

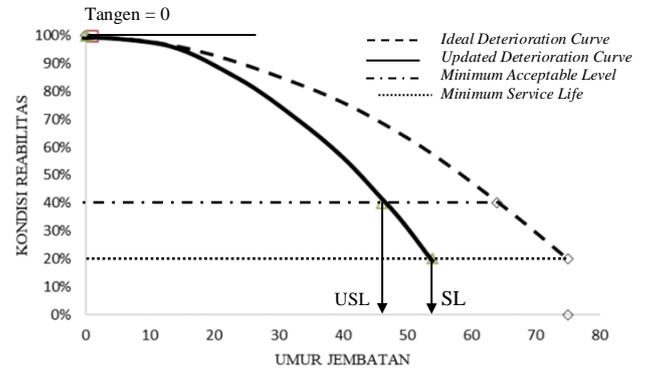
$$CR_I^{PDC}(t) = CR_{IR} \times e^{\left[ \frac{\ln(CR_{Ii})x (t-tr+1)^3}{t_i^3} \right]} \tag{15}$$

Dimana  $CR_{IR}$  adalah keandalan kondisi terintegrasi langsung setelah tindakan rehabilitasi;  $CR_{Ii}$  adalah keandalan kondisi terintegrasi setelah tindakan rehabilitasi;  $tr$  adalah waktu tindakan rehabilitasi yang dilakukan saat kondisi rehabilitas jembatan 60%; dan  $t_i$  = waktu inspeksi setelah tindakan rehabilitasi.

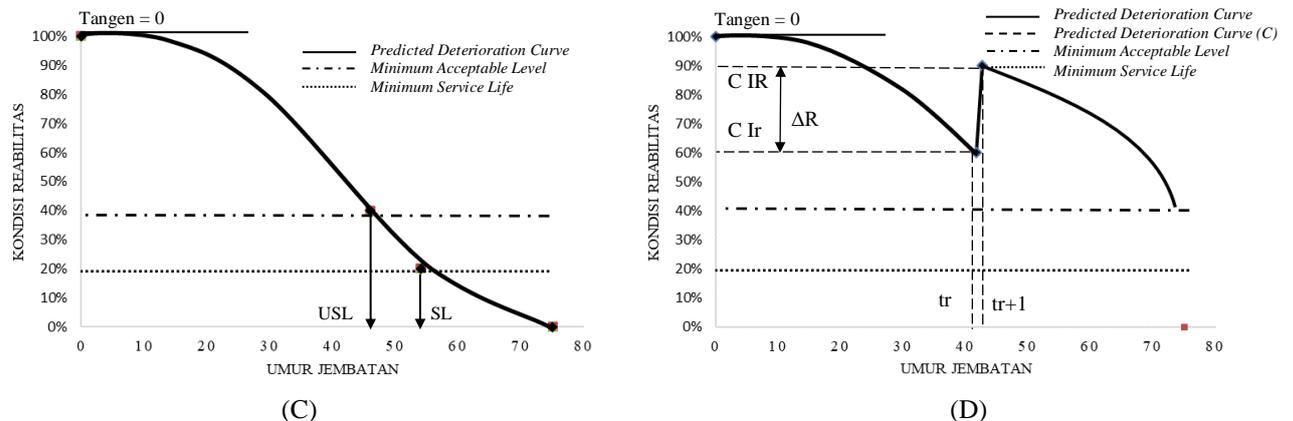
Pada saat kondisi rehabilitas 60% yaitu pada tahun ke-43 di tahun 2053 direncanakan tindakan perbaikan dan rehabilitasi. Menggunakan Persamaan (15) diperoleh nilai 21,57 ~ 22 tahun. Sehingga jembatan diprediksikan dapat kembali sesuai umur rencana yaitu  $CR_{IR} = 75$  tahun. Kurva deteriorasi Weibull Distribution Function pada 3 jembatan di jalan Tol Solo-Ngawi dapat dilihat pada Gambar 1(A), (B), (C), dan (D).



(A)



(B)



Gambar 1. (A) Ideal Deterioration Curve (IDC), (B) Updated Deterioration Curve (UDC), (C) Predicted Deterioration Curve (PDC) tanpa tindakan rehabilitasi, (D) Predicted Deterioration Curve (PDC) dengan tindakan rehabilitasi.

#### 4 KESIMPULAN

Penilaian kondisi jembatan menggunakan BCI WSDOT pada 3 jembatan sungai di jalan tol ruas Solo - Ngawi yang meliputi Jembatan Gondangrejo, Jembatan Bengawan Solo, dan Jembatan Gropol menunjukkan bahwa kondisi jembatan secara umum masih dalam kondisi baik dan laik fungsi. Model Kurva Deteriorasi Ideal (IDC) yang menunjukkan dimana USL merupakan ambang batas untuk tingkat fungsional dan keamanan pada kondisi reabilitas 40% dan umur layanan minimum (SL) pada kondisi reabilitas 20%. Kurva kerusakan ini diplot berdasarkan umur rencana jembatan pedoman persyaratan umum persyaratan umum jembatan 2015 yaitu 75 th. UDC pada kasus yang disajikan menunjukkan bahwa setelah dilakukan inspeksi, jembatan diperkirakan mencapai akhir umur layannya pada tahun ke-53 yaitu pada 2063. Selanjutnya PDC merencanakan tindakan perbaikan dan rehabilitasi yang dilakukan pada saat kondisi reabilitas 60% atau pada tahun ke-43 yaitu pada 2053 yang dapat meningkatkan umur layan jembatan yaitu 22 tahun, sehingga kondisi reabilitas terintegrasi setelah tindakan rehabilitasi ( $CR_{IR}$ ) dapat kembali sesuai umur rencana. Kelebihan penggunaan metode BCI WSDOT dalam penilaian jembatan adalah memiliki kondisi peringkat setiap komponen struktural yang detail berdasarkan sensitifitas kerusakannya, serta Fungsi Distribusi Weibull (WDF) merupakan model terbaik untuk kurva siklus hidup jembatan dengan data inspeksi yang terbatas.

#### 5. REFERENSI

- Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia. (1993). "Panduan dan Rencana Program IBMS".
- Kobayashi, K., Kiyoyuki Kaito, & Lethanh, N. (2010). "Deterioration Forecasting Model with Multistage Weibull Hazard Functions". *Journal of Infrastructure System* © ASCE. <https://doi.org/10.1061/ASCEIS.1943-555X.0000033>
- Sobanjo, J., Asce, M., Mtenga, ; Primus, & Rambo-Roddenberry, M. (2010). "Reliability-Based Modeling of Bridge Deterioration Hazards". *Journal of Bridge Engineering*. <https://doi.org/10.1061/ASCEBE.1943-5592.0000074>
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). *Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan*.
- Main Roads Western Australia. (2017). "Detailed Visual Bridge Inspection Guidelines for Concrete and Steel Bridges".
- Alsharqawi, M., Zayed, T., & Abu Dabous, S. (2018). "Integrated Condition Rating and Forecasting Method for Bridge Decks Using Visual Inspection and Ground Penetrating Radar". *Automation in Construction*, 89, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.016>