

— Editor —

Santoso Prayitno Sugondo

INSTRUMENTASI
PENDETEKSI KONDISI

Rel Kereta Api

Daryono Restu Wahono

INSTRUMENTASI
PENDETEKSI KONDISI
Rel Kereta Api

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Rights Reserved

Editor
Santoso Prayitno Sugondo

INSTRUMENTASI
PENDETEKSI KONDISI
Rel Kereta Api

Daryono Restu Wahono

LIPI Press

© 2015 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Pusat Penelitian Metrologi

Katalog dalam terbitan

Instrumentasi Pendeteksi Kondisi Rel Kereta Api/Daryono Restu Wahono.–Jakarta: LIPI Press,
2015.

xiv + 85 hlm.; 14,8 x 21cm

ISBN 978-979-799-839-4

1. Instrumentasi

2. Pendeteksi

3. Rel

4. Kereta Api

681.2

Editor : Santoso Prayitno Sugondo
Copy editor : Tantrina Dwi Aprianita dan Fadly Suhendra
Proofreader : Noviasuti Putri Indrasari dan Prapti Sasiwi
Penata Isi : Astuti Krisnawati, Meita Safitri, Rahma Hilma Taslima, dan Dhevi
E.I.R. Mahelingga
Desainer sampul : Dhevi E.I.R. Mahelingga
Cetakan pertama : Desember 2015



LIPI

Diterbitkan oleh:

LIPI Press, anggota of Ikapi

Jln. Gondangdia Lama 39, Menteng, Jakarta 10350

Telp: (021) 314 0228, 314 6942. Faks.: (021) 314 4591

E-mail : press@mail.lipi.go.id

Website : lipipress.lipi.go.id



LIPI Press



@lipi_press

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR	vii
PENGANTAR PENERBIT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
PRAKATA	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Pemeriksaan Kondisi Rel.....	4
BAB 2 INSTRUMENTASI PENDETEKSI KONDISI REL	
KERETA API.....	7
A. GPS <i>Tracking</i>	8
B. Pengukuran Menggunakan Akselerometer.....	12
C. Pengukuran Menggunakan Kamera Vision.....	16
BAB 3 FUNGSI GPS DALAM PEMERIKSAAN REL.....	23
A. Menentukan Posisi Menggunakan GPS	24
B. Pemantauan Kecepatan Kereta Api Menggunakan GPS	32
BAB 4 MENDETEKSI REL MENGGUNAKAN	
AKSELEROMETER.....	37
A. Mendeteksi Kemiringan Rel.....	38
B. Mendeteksi Simpangan Arah X.....	42
C. Mendeteksi Simpangan Arah Y.....	43

BAB 5 MENDETEKSI REL MENGGUNAKAN KAMERA.....	59
A. Mendeteksi Kondisi Rel Jarak Jauh.....	59
B. Mendeteksi Kesejajaran Rel	62
C. Mendeteksi Kondisi Putus Rel	64
BAB 6 PENUTUP.....	77
DAFTAR PUSTAKA.....	79
INDEKS.....	81
BIOGRAFI PENULIS.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Satelit GPS (Nusagps 2015)	9
Gambar 2. Blok Diagram Sensor Akselerometer ADXL 330.....	12
Gambar 3. Sensor MEMS.....	13
Gambar 4. Gerak Harmonik Getaran	14
Gambar 5. Ilustrasi Pemanfaatan Kamera Wi-Fi pada Beberapa Komputer	19
Gambar 6. Hasil Pengamatan Saat Uji Coba di Bandung Menggunakan Kamera Wi-Fi.....	21
Gambar 7. Pengukuran <i>Real Time</i>	25
Gambar 8. Urutan Program GPS <i>Client</i>	27
Gambar 9. Urutan Program GPS <i>Server</i>	27
Gambar 10. Pengukuran <i>Way Point</i> Menggunakan Komputer	29
Gambar 11. Letak Stasiun-stasiun dari Stasiun Serpong sampai Manggarai pada Peta Digital.....	31
Gambar 12. Ilustrasi Pengukuran Kecepatan dengan GPS	33
Gambar 13. Pembuatan Sistem Informasi Geografi	34
Gambar 14. Perangkat Pengukur Kecepatan Menggunakan GPS	34
Gambar 15. Tampilan Pengukur Kecepatan Menggunakan GPS pada Komputer Saat Pengukuran <i>Tracking</i> Kereta Api.....	36
Gambar 16. Ilustrasi Sistem Suspensi Gabungan	39
Gambar 17. Hasil Pengukuran Nilai Tegangan untuk Kemiringan Akselerometer 90° ke Kiri dan Kemiringan 90° ke Kanan pada Arah Y	40
Gambar 18. Tampilan Hasil Pengukuran Kemiringan Menggunakan Akselerometer	41
Gambar 19. Diagram Sistem Pengukuran Kemiringan Kereta Saat Berjalan.....	42

Gambar 20. Grafik Percepatan Sesaat.....	43
Gambar 21. Ilustrasi Penyimpangan Rel ke arah Y.....	44
Gambar 22. Ilustrasi Sistem Dieksitasi oleh Gerak Titik Penopang pada Arah Y	46
Gambar 23. Pengukuran Vibrasi Kereta Api Sumbu Y yang Diukur dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara.....	50
Gambar 24. Ilustrasi Penempatan Akselerometer pada Sumbu Z.....	52
Gambar 25. Instrumen Pengukur Vibrasi Perjalanan Kereta Api.....	53
Gambar 26. Grafik Hasil Pengukuran Vibrasi Kereta Api Sumbu Z yang Diukur Akselerometer dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara.....	56
Gambar 27. Lingkungan Ekstrem Rel Kereta Api Berupa Pegunungan Kapur yang Mudah Longsor	60
Gambar 28. Penempatan Kamera pada Pengukuran Jarak Jauh pada Lori di Stasiun Bandung	61
Gambar 29. Gambar Lingkungan di Depan Lori	62
Gambar 30. Gambar Kondisi Rel yang Diamati di Stasiun Bandung	63
Gambar 31. Rel Kereta yang Putus.....	64
Gambar 32. Gaya yang Terjadi pada Saat Kondisi Putus Rel Kereta.....	66
Gambar 33. Letak Posisi Kamera Vision dan Sensor Akselerometer pada Lori	67
Gambar 34. Data Baku GPS dan Sensor Akselerometer dalam Bentuk Hyperterminal	68
Gambar 35. Tampilan Hasil Pengukuran Vibrasi Pendeteksian Kondisi Putus Rel Kereta Api.....	69
Gambar 36. Tampilan Hasil Perekaman Kamera Vision untuk Pendeteksian Kondisi Putus Rel Kereta Api.....	70
Gambar 37. Tampilan Hasil Pendeteksian Kondisi Rel Kereta	71
Gambar 38. 1951 USAF 3-bar <i>Resolving Test Power Chart</i>	74
Gambar 39. Mendeteksi Lebar Putus Rel	74

PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Penyediaan terbitan ilmiah yang berkualitas adalah salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk ikut serta dalam mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku *Instrumentasi Pendeteksi Kondisi Rel Kereta Api* ini mengulas tentang sistem instrumentasi yang dapat digunakan untuk memantau kondisi rel kereta api. Instrumen ini dilengkapi dengan GPS, akselerometer, dan kamera vision yang digunakan untuk mendeteksi kondisi rel dan melengkapi fungsi Juru Pemeriksa Jalan Rel (JPJ) yang berjalan kaki sehingga kerusakan dan gangguan dapat segera diketahui. Kondisi rel kereta api yang baik dapat mewujudkan perjalanan kereta api yang aman dan nyaman bagi penggunanya.

Semoga buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi penentu kebijakan perkeretaapian dalam menerapkan sistem perkeretaapian modern, mahasiswa dalam memperdalam pengetahuan tentang persinyalan untuk pemeriksaan rel kereta api, dan masyarakat pencinta perkeretaapian yang peduli keselamatan berkereta api sehingga keselamatan dan kelancaran berkereta api dapat dicapai.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

LIPI Press

KATA PENGANTAR

Keselamatan dan keamanan perkeretaapian adalah tanggung jawab berbagai pihak. Dalam UU Nomor 23 Tahun 2007 dipisahkan pengertian keamanan dan keselamatan. Keamanan adalah kondisi terhindarnya perjalanan kereta api akibat adanya faktor eksternal, baik karena adanya gangguan alam maupun adanya faktor manusia. Sementara itu, keselamatan adalah kondisi terhindarnya perjalanan kereta api dari kecelakaan kereta api akibat faktor internal. Salah satu faktor pendukung keselamatan kereta api adalah kelaikan operasi sarana dan prasarana.

Berangkat dari uraian tersebut, secara umum perumusan masalah sekaligus tujuan yang hendak diwujudkan adalah meningkatkan efisiensi waktu pemeriksaan kondisi rel kereta api dan meningkatkan akurasi hasil pemeriksaan rel kereta api. Dengan demikian, jaminan keselamatan penumpang kereta api akan meningkat.

Buku ini berisi mengenai sistem instrumentasi yang difungsikan sebagai instrumen pendeteksi kondisi rel. Instrumen yang digunakan pada pendeteksian rel saat ini masih terbatas pada GPS, akselerometer, dan kamera vision yang digunakan untuk mendeteksi kondisi rel dan melengkapi fungsi Juru Pemeriksa Jalan Rel (JPJ) yang berjalan kaki. Fungsi dari tiap-tiap instrumen yang digunakan secara umum masih sebatas untuk melengkapi fungsi JPJ. Misalnya, GPS hanya untuk mengetahui lokasi pengukuran, akselerometer untuk mendeteksi

adanya guncangan yang diakibatkan adanya kekurangan dari rel kereta api, dan kamera sekadar menggantikan fungsi mata untuk mengamati kondisi rel akibat adanya kekurangsempurnaan kondisi rel kereta api.

Dalam buku ini dijelaskan mengenai perangkat instrumentasi pendeteksi kondisi rel yang berfungsi untuk menjejaki setiap jengkal rel dan memastikan kondisi rel dalam keadaan baik dan disertai data rekamannya. Kesempurnaan kondisi rel kereta api akan didapat jika pendeteksian kondisi rel dilakukan secara berkesinambungan dan ditingkatkan terus-menerus sesuai dengan tuntutan teknologi. Untuk itu, dibutuhkan keseriusan dan kerja sama antara para peneliti dan pemangku kepentingan sehingga perjalanan kereta api akan terjamin keselamatannya. Semoga buku ini dapat menjadi referensi bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Serpong, Februari 2014

Editor

PRAKATA

Segala puja dan puji hanya milik Allah Swt. semata yang telah melimpahkan rahmat-Nya kepada kita semua, khususnya penulis, sehingga dapat menyelesaikan buku tentang pemeriksaan rel kereta api. Buku ini ditulis berdasarkan hasil penelitian tentang pemeriksaan kondisi rel kereta api sejak tahun 2007 dengan judul penelitian “Otomatisasi Sinyal untuk Pemantauan Kereta Api dengan Pemanfaatan Metode *Tracking* dan Teknologi GPS, GIS, dan GPRS.” Pada tahun 2009 dilanjutkan penelitian dengan judul “Otomatisasi Sinyal untuk Memberi Peringatan pada Pintu Perlintasan Kereta Api Swadiri dengan Pemanfaatan Metode *Tracking* dan Teknologi GPS, GIS, dan GPRS.” Selanjutnya, pada tahun 2010 dilanjutkan penelitian dengan judul “Otomatisasi Pendeteksi Kondisi Rel untuk Memberi Peringatan Keamanan Perjalanan Kereta Api menggunakan Akselerometer dengan Pemanfaatan Metode *Tracking* dan Teknologi GPS, GIS, dan GPRS.” Kemudian tahun 2012 dan 2013 dilanjutkan penelitian dengan judul “Sistem Pemantau Kondisi Rel Kereta Api.”

Selain dari hasil penelitian, pembahasan buku ini juga berisi hasil kajian dari sumber-sumber pustaka yang mengulas sistem persinyalan untuk kebutuhan pemeriksaan kondisi rel saat ini. Selain dapat menjadi pegangan bagi mahasiswa yang ingin memperdalam pengetahuan tentang sistem persinyalan untuk pemeriksaan rel perkeretaapian, buku ini juga dapat menambah wawasan para pencinta perkereta-

apian dan mereka yang peduli keselamatan berkereta api, khususnya penentu kebijakan perkeretaapian. Buku ini juga diharapkan menjadi bahan pembelajaran bagi pelaksana lapangan apabila nantinya akan diterapkan sistem perkeretaapian modern.

Pada kesempatan ini, kami mengucapkan terima kasih kepada Kepala Puslit Metrologi LIPI, Bapak Mego Pinandito, M.Eng., yang telah mengizinkan diselenggarakannya penelitian instrumentasi transportasi, khususnya bidang sinyal perkeretaapian. Kami mengucapkan terima kasih kepada pengelola program Insentif Peneliti dan Perakayasa Ristek tahun 2009 yang telah mendanai penelitian kami. Demikian pula dengan pengelola program Insentif Sinas Ristek yang telah mendanai penelitian kami untuk tahun 2012–2013. Terima kasih kami sampaikan kepada Direktur Keselamatan dan Keamanan PT KAI, Bapak Rono Pradipto, yang memberi ide dibuatnya alat pendeteksi kondisi rel kereta api dan memberi masukan atas segala pelaporan. Demikian juga dengan Kepala DAOP 2 dan Kepala Bagian Rel dan Jembatan DAOP 2 yang membantu dalam melakukan percobaan dan memberi masukan-masukan atas kekurangan dari prototipe yang akan dibuat. Tak lupa ucapan terima kasih kepada para peneliti dan teknisi yang telah tergabung dan membantu dalam penelitian serta pihak lain yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu.

Semoga buku ini dapat menjadi pemicu terbitnya buku-buku lain dengan edisi yang lebih baik dan sempurna. Kritik dan saran konstruktif dari pembaca buku ini sangat kami hargai. Semoga buku ini dapat bermanfaat dan membangkitkan kecintaan masyarakat terhadap perkeretaapian di Indonesia.

Serpong, Februari 2014

Penulis

BAB I

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Era globalisasi dan perdagangan bebas merupakan era yang penuh kompetisi. Agar dapat bersaing dengan negara lain, diperlukan terobosan-terobosan baru yang efisien dan ekonomis di segala bidang, termasuk bidang transportasi massal. Alat transportasi massal yang dianggap paling potensial adalah kereta api. Daya angkut yang besar, waktu tempuh yang terjadwal, dan bebas macet membuat banyak orang mulai beralih dari angkutan jalan raya ke kereta api. Semakin banyak pengguna angkutan kereta api, tetapi sarana pemeriksaan kondisi rel kereta api masih terbatas. Masih sering terjadi kecelakaan kereta api, misalnya kereta anjlok di banyak tempat. Keadaan itu sangat merugikan masyarakat pengguna kereta api. Oleh karena itu, dibutuhkan perangkat yang dapat mengawasi kondisi rel kereta api secara kontinu. Tujuannya untuk memastikan rel kereta api selalu dalam keadaan baik. Untuk menjamin kondisi rel kereta api selalu dalam keadaan baik, dibutuhkan sebuah perangkat pendeteksi kondisi rel dengan kinerja yang baik sesuai standar yang berlaku. Instrumentasi pendeteksi kondisi rel kereta api yang dilengkapi dengan sistem otomatisasi inspeksi kondisi rel kereta akan memastikan rel dalam

kondisi baik dan secara otomatis dapat mewujudkan perjalanan kereta lebih aman, nyaman, intensif, dan akurat.

Kondisi rel kereta api yang baik akan menjamin kelancaran dan keselamatan berkereta api. Hal itu tentunya akan semakin memicu masyarakat untuk beralih dari angkutan jalan raya ke angkutan kereta api. Perjalanan kereta api menjanjikan jadwal dan waktu yang tepat. Berbeda halnya dengan transportasi jalan raya. Pada jam sibuk akan terjadi kemacetan parah akibat bertambahnya kendaraan roda dua dan roda empat. Di Jakarta saja, penambahan kendaraan roda dua (motor) dalam satu tahun sebanyak lima juta unit. Keadaan ini sudah berjalan tiga tahun terakhir. Jika keadaan ini dibiarkan, dapat diprediksi dua tahun ke depan Jakarta dan sekitarnya akan penuh dengan kendaraan roda dua. Belum lagi penambahan kendaraan roda empat di daerah yang sama setiap tahunnya bertambah 200 ribu unit. Tentunya akan semakin membuat macet jalan-jalan Jakarta dan sekitarnya.

Instrumentasi pendeteksi kondisi rel kereta api sangat diperlukan. Di masa mendatang, fasilitas rel kereta api harus bebas dari pejalan kaki karena di sepanjang jalan kereta api dipenuhi perangkat yang dapat membahayakan pejalan kaki. Pola pengoperasian kereta api modern dengan jadwal yang padat dan ketepatan waktu yang akurat membutuhkan sarana dan prasarana yang baik. Hal tersebut sulit diwujudkan bila hanya mengandalkan fasilitas yang dioperasikan secara manual. Fasilitas yang ada—berupa rel ganda dengan jadwal keberangkatan dan kedatangan yang begitu padat—memerlukan sistem pemantauan terpadu. Pemantauan terpadu membutuhkan perangkat yang memadai. Oleh karena itu, perangkat pemantau perjalanan kereta api dibutuhkan demi terselenggaranya pemanfaatan fasilitas yang lebih berdaya guna.

Sebagai dukungan terhadap konsep kereta api modern, LIPI berusaha membuat alat pendeteksi kondisi rel kereta api dengan menggunakan metode *tracking*. Alat ini dapat mendeteksi kondisi

rel kereta api jika terjadi gangguan pada fasilitas tersebut dan memberikan sinyal alarm jika terdeteksi kondisi rel yang menyimpang atau tidak sesuai standar.

Tindak lanjut yang dilakukan oleh LIPI adalah dengan membuat prototipe alat pendeteksi kondisi rel kereta api yang mampu memberikan informasi bagi pengelola maupun pelaksana angkutan kereta api. Prototipe ini bila ditempatkan pada lori inspeksi diharapkan mampu menanggulangi masalah kondisi rel kereta api dan melengkapi fungsi Juru Pemeriksa Jalan Rel (JPJ) secara terbatas. Prototipe yang ditempatkan pada kereta api dapat merekam kondisi rel kereta api secara terbatas dan dapat digunakan sebagai peringatan dini bila terjadi gangguan sepanjang rel yang dilaluinya. Kerusakan pada rel kereta api akan dapat terdeteksi dengan adanya anomali pada data vibrasi sehingga posisi dan kondisinya dapat diketahui.

Pengukuran kondisi rel kereta api dilakukan menggunakan GPS, akselerometer, dan kamera vision yang merupakan pokok bahasan alat pendeteksi kondisi rel kereta api. Dengan pengukuran *way point* secara *real time* dan *online* menggunakan GPS, akan diketahui posisi kereta api dari waktu ke waktu sehingga memudahkan mengetahui letak gangguan bila kereta dilengkapi pendeteksi gangguan rel kereta api. Pengukuran vibrasi tiga sumbu dilakukan secara *real time* dan *online* untuk mengetahui seberapa besar gangguan yang terjadi pada rel kereta api dan perekaman menggunakan kamera vision untuk mendeteksi kondisi rel secara langsung. Bagi operator, rekamannya dapat digunakan untuk analisis fasilitas rel.

Prototipe yang dikembangkan dan ditulis dalam buku ini adalah prototipe yang benar-benar baru. Prototipe ini diharapkan dapat membantu memecahkan masalah pengelolaan sarana perkeretaapian.

Dalam pembuatan instrumen pendeteksi kondisi rel kereta api, penulis mendapat masukan dari pihak pengelola sarana jalan dan

jembatan rel, dan direktur keselamatan PT KAI Persero. Instrumen yang digunakan pada pendeteksian rel saat ini masih terbatas pada GPS, akselerometer, dan kamera vision untuk mendeteksi kondisi rel dan melengkapi fungsi Juru Pemeriksa Jalan rel (JPJ) yang berjalan kaki. Pada bab 2 dijabarkan cara kerja masing-masing instrumen yang digunakan secara umum dan spesifikasinya. Hal itu demi memudahkan pembaca untuk mencoba bahkan mengembangkan perangkat ini di kemudian hari. Pada bab 3, bab 4, dan bab 5 dijelaskan beberapa aplikasi tiap-tiap instrumen untuk keperluan inspeksi kondisi rel kereta api. Batasan instrumen yang dikembangkan dapat melengkapi fungsi JPJ.

B. PEMERIKSAAN KONDISI REL

Pemeriksaan kondisi rel dapat dilakukan dengan Inspeksi Visual *in-situ* (IVI) dan Inspeksi Visual *Remote* (RVI). IVI adalah metode umum kontrol kualitas, data akuisisi, dan analisis data. Inspeksi visual yang digunakan dalam pemeliharaan fasilitas, yakni pemeriksaan peralatan dan struktur menggunakan sebagian atau semua indra manusia untuk mengamati fasilitas yang menjadi objek pemeriksaan. Inspeksi visual adalah inspeksi yang seutuhnya menggunakan nalar manusia untuk menilai kondisi fasilitas yang diperiksa. Pada pemeriksaan visual terdapat pemeriksaan peralatan inspeksi nonkhusus dengan menggunakan *ultrasound*, *X-ray*, inframerah, dan lain-lain. Pada pemeriksaan nonkhusus, setiap juru periksa diwajibkan mempunyai sertifikat dari Kementerian Ketenagakerjaan untuk dapat mengoperasikan peralatan karena sangat berbahaya jika tidak dilakukan secara benar. Pada penginspeksian fasilitas menggunakan RVI, operator tidak masuk ke area inspeksi, tetapi menggunakan bantuan visual *remote* kamera, seperti video fiberscopes, Pan-Tilt-Zoom kamera, akselerometer, dan lain-lain.

Sistem pemeriksaan kondisi rel kereta api terdiri atas empat tingkat, yaitu

1. Pemeriksaan yang dilakukan oleh JPJ (Juru Pemeriksa Jalan Rel).
2. Pemeriksaan yang dilakukan oleh petugas inspeksi.
3. Pemeriksaan yang dilakukan oleh kereta ukur.
4. Pemantauan kondisi rel dengan alat yang ditempatkan pada kereta api reguler.

Pemeriksaan oleh petugas JPJ dilaksanakan secara harian, minimal satu kali dalam satu hari sebelum kereta pertama melintasi rel yang dimaksud. Pemeriksaan dilakukan oleh petugas dengan berjalan kaki. *Output*-nya adalah rel dapat dilalui oleh kereta api dengan aman.

Pemeriksaan oleh petugas inspeksi dilaksanakan secara mingguan. Kondisi rel yang dimaksud diperiksa minimal satu kali dalam sebulan. Pemeriksaan dilakukan oleh petugas dengan menggunakan lori inspeksi. *Output*-nya adalah tidak terjadi kerusakan pada rel dan rel dapat dilalui oleh kereta api dengan aman.

Pemeriksaan oleh petugas kereta ukur dilaksanakan secara bulanan. Kondisi rel yang dimaksud diperiksa minimal satu kali dalam enam bulan. Pemeriksaan dilakukan oleh petugas dengan dibantu kereta ukur yang dilengkapi peralatan pemeriksa kondisi rel yang andal dan bekerja sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. *Output*-nya adalah rel dalam kondisi baik, tidak mengalami kerusakan, dan dapat dilalui oleh kereta api dengan aman.

Pemantauan dapat juga dilakukan oleh kereta api reguler. Caranya dengan menempatkan peralatan pendeteksi kondisi rel di kereta api sehingga kereta api akan mencatat semua kejadian di rel yang dilewatinya. Kegiatan ini sudah dilakukan pada kereta api cepat di negara maju.

Sistem pemantauan kondisi rel kereta api yang dipasang di atas kereta lori yang terdiri dari kamera, akselerometer, dan GPS yang melengkapi fungsi JPJ mempunyai beberapa keunggulan, yakni

1. Objek dapat dilihat langsung sehingga perubahan yang terjadi dapat dibuktikan dalam bentuk gambar dan terekam.
2. Penempatan kamera sebagai sensor vision dapat dilakukan dengan mudah. Jika terjadi kerusakan akan mudah didapat penggantinya, layanan purnajualnya mudah dijangkau.
3. Harga sangat murah dan mudah didapat.
4. Akselerometer yang digunakan adalah tipe komersial dengan spesifikasi industri sehingga tahan ditempatkan pada medan yang ekstrem.
5. Akselerometer dapat menginformasikan bila terjadi gangguan rel terhadap 3 posisi yaitu: X untuk arah depan, Y untuk arah samping, dan Z untuk arah atas dan bawah.
6. Informasi posisi lori saat pemeriksaan didapat dari GPS.

BAB 2

INSTRUMENTASI PENDETEKSI KONDISI REL KERETA API

Instrumentasi pendeteksi rel kereta api adalah perangkat elektromekanik yang berfungsi menggantikan fungsi indra manusia. Indra penglihatan digantikan oleh kamera, indra peraba digantikan oleh akselerometer, dan penetapan posisi pengukuran dilakukan dengan menggunakan GPS. Untuk mengenali kondisi rel kereta api, gambar yang diambil menggunakan kamera dan getaran yang diambil menggunakan akselerometer yang diubah menjadi besaran listrik. Selanjutnya, dapat dikenali sebagai besaran simpangan dan dapat langsung diketahui nilai dari media yang dideteksinya, yaitu rel kereta api.

Agar perangkat sistem pemantau kondisi rel kereta api andal dapat terwujud, diperlukan pemilihan instrumen yang tepat—yang dapat menginterpretasikan kondisi sesungguhnya di lapangan dengan ketelitian yang cukup. Instrumen yang dikembangkan menggunakan tiga sensor dengan akurasi tinggi, yaitu GPS, akselerometer, dan kamera vision. Fungsi GPS pada pemeriksaan rel kereta api adalah untuk menetapkan posisi dengan teknik pengukuran menggunakan *GPS tracking*. Sensor akselerometer difungsikan untuk mendeteksi getaran yang terjadi pada rel kereta api jika rel kereta api mengalami

kerusakan. Kamera difungsikan untuk melihat kondisi rel kereta api, misalnya ada paku rel yang hilang, rel yang rusak, atau melihat kejadian pada saat ada getaran yang cukup besar terekam akselerometer. Menggabungkan ketiga instrumen menjadi sebuah prototipe pendeteksi kondisi rel kereta api dapat membantu pemeriksaan rel kereta api dan melengkapi tugas JPJ yang selama ini melakukan pemeriksaan hanya dengan dibekali lampu senter dan palu. Prototipe ini apabila ditempatkan pada lori inspeksi diharapkan mampu menanggulangi masalah kondisi rel kereta api secara berkala. Prototipe pendeteksi kondisi rel kereta api yang ditempatkan pada kereta api dapat merekam kondisi rel kereta api secara kontinu. Selain itu, prototipe ini juga dapat digunakan sebagai peringatan dini apabila terjadi gangguan pada rel kereta api sepanjang rel yang dilaluinya. Kerusakan pada rel kereta api akan dapat terdeteksi dengan adanya anomali pada data vibrasi, di mana posisi dan kondisi dapat diketahui.

Sistem kerja dan metode pengukuran ketiga instrumen yang digunakan dibahas sebagai berikut.

A. GPS TRACKING

Global Positioning System (GPS) merupakan sistem untuk menentukan posisi dan navigasi secara global dengan menggunakan satelit. Sistem *GPS/Navigation Satelit Timing and Ranging Global Positioning System* (NAVSTAR GPS) mempunyai tiga segmen, yaitu: satelit, pengontrol, dan penerima/pengguna. Satelit GPS mengorbit bumi dengan orbit dan kedudukan yang tetap, berjumlah 24 satelit—21 satelit aktif dan 3 sisanya sebagai cadangan. Ilustrasi satelit GPS yang beroperasi dapat dilihat pada Gambar 1.

Cara kerja GPS tidak terlepas dari satelit GPS dengan orbit tertentu. Satelit ini berfungsi sebagai *transceiver* yang pengoperasiannya dilakukan oleh pengontrol dari bumi. Satelit GPS digunakan sebagai



Gambar 1. Satelit GPS (Nusagps 2015)

penerima sinyal satelit untuk berbagai kebutuhan, misalnya posisi, arah, jarak, waktu, dan ketinggian. Fungsi dari setiap komponennya adalah:

1. Satelit berfungsi menerima dan menyimpan data yang ditransmisikan oleh stasiun-stasiun pengontrol, menyimpan dan menjaga informasi waktu berketelitian tinggi (ditentukan dengan jam *atomic* di satelit), dan memancarkan sinyal dan informasi secara kontinu ke pesawat penerima (*receiver*) dari pengguna.
2. Pengontrol berfungsi mengendalikan satelit dari bumi untuk mengecek kesehatan satelit, penentuan dan prediksi orbit dan waktu, sinkronisasi waktu antarsatelit, dan mengirim data ke satelit.
3. Penerima berfungsi menerima data dari satelit dan memprosesnya untuk menentukan posisi, arah, jarak, dan waktu yang diperlukan pengguna.

Manfaat penggunaan GPS untuk penentuan posisi kereta api, yaitu:

- Mengetahui titik koordinat stasiun.
- Mengetahui titik koordinat sinyal muka, sinyal masuk, dan tetapan kecepatan perjalanan kereta.
- Mengetahui standar jarak sinyal muka dan masuk di Indonesia.
- Menghitung koordinat sinyal muka dan masuk menggunakan teori kuantor dan lain-lain.
- Menetapkan kecepatan atau kondisi berhenti kereta.
- Menghubungkan ke *microcontroller* (mengirim data koordinat).
- Mengubah koordinat menjadi tetapan kecepatan, membandingkan dengan hasil GSM dan *Dummy Balise (Inside micro)*.

4. Penentuan Posisi dengan GPS

Pada dasarnya, penentuan posisi dengan GPS adalah pengukuran jarak secara bersama-sama ke beberapa satelit (yang koordinatnya telah diketahui) sekaligus. Untuk menentukan suatu titik di bumi, *receiver* setidaknya membutuhkan 4 satelit yang sinyalnya dapat ditangkap dengan baik. Secara *default*, posisi atau koordinat yang diperoleh bereferensi ke global datum yaitu *World Geodetic System*. Penentuan posisi menggunakan GPS secara garis besar dibagi menjadi dua metode, yaitu metode absolut dan metode relatif.

- Metode absolut atau *point positioning* menentukan posisi hanya berdasarkan pada 1 pesawat penerima (*receiver*) saja. Ketelitian posisi dalam beberapa meter (tidak berketelitian tinggi) dan umumnya hanya diperuntukkan bagi keperluan navigasi.
- Metode relatif atau *differential positioning* menentukan posisi dengan menggunakan lebih dari satu *receiver*. Satu GPS dipasang pada lokasi tertentu di muka bumi dan secara terus-menerus menerima sinyal dari satelit, dalam jangka waktu tertentu dijadikan sebagai referensi bagi yang lainnya. Metode ini menghasilkan

posisi berketelitian tinggi dan diaplikasikan untuk keperluan survei geodesi ataupun pemetaan yang memerlukan ketelitian tinggi.

5. Sistem Koordinat GPS

Pengenalan sistem koordinat sangat penting agar dapat menggunakan GPS secara optimum. Setidaknya ada dua klasifikasi sistem koordinat yang dipakai oleh GPS maupun dalam pemetaan, yaitu sistem koordinat global yang biasa disebut sebagai koordinat geografi dan sistem koordinat di bidang proyeksi.

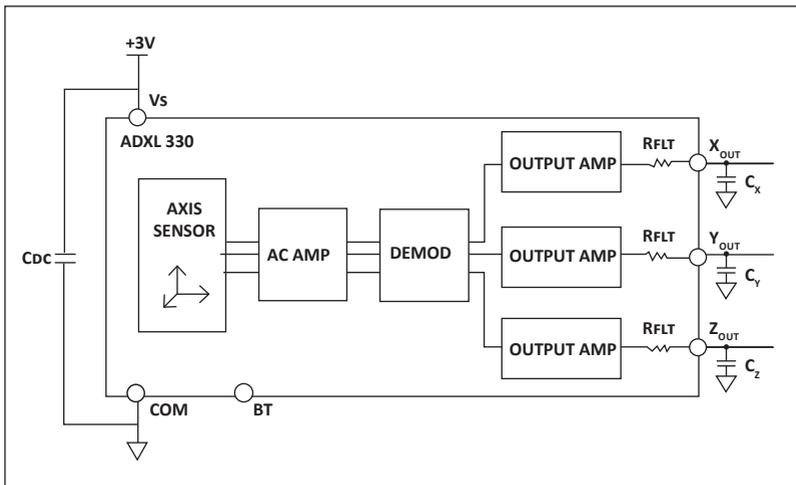
- Koordinat geografi diukur dalam lintang dan bujur dalam besaran derajat desimal, derajat menit desimal, atau derajat menit detik. Lintang diukur terhadap ekuator sebagai titik nol (0° sampai 90° positif ke arah utara dan 0° sampai 90° negatif ke arah selatan). Bujur diukur berdasarkan titik nol di Greenwich (0° sampai 180° ke arah timur dan 0° sampai 180° ke arah barat).
- Koordinat di bidang proyeksi merupakan koordinat yang dipakai pada sistem proyeksi tertentu. Umumnya berkaitan erat dengan sistem proyeksinya, namun adakalanya digunakan koordinat geografi dalam bidang proyeksi. Beberapa sistem proyeksi yang lazim digunakan di Indonesia adalah: proyeksi merkator, *transverse* merkator, universal *transverse* merkator, kerucut konformal. Tiap-tiap sistem ada kelebihan dan kekurangannya. Pemilihan proyeksi umumnya didasarkan pada tujuan peta yang akan dibuat. Dari beberapa sistem proyeksi tersebut, proyeksi *transverse* merkator dan universal *transverse* merkator yang banyak digunakan di Indonesia.

Berbicara tentang sistem koordinat dalam bidang proyeksi tidak dapat terlepas dari datum yang digunakan. Ada dua macam datum yang umum digunakan dalam perpetaan, yaitu datum horizontal dan datum vertikal. Datum horizontal dipakai untuk menentukan

koordinat peta (X,Y), sedangkan datum vertikal untuk menentukan elevasi (peta topografi) ataupun kedalaman (peta bimetri). Perhitungan dilakukan dengan transformasi matematis tertentu.

B. PENGUKURAN MENGGUNAKAN AKSELEROMETER

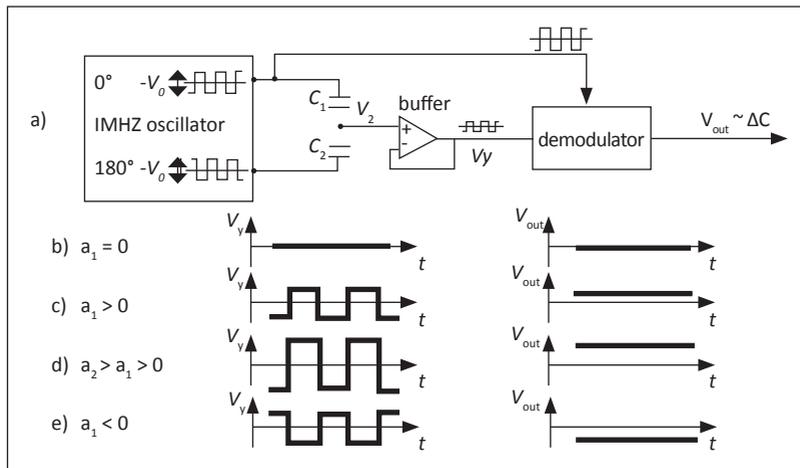
Akselerometer adalah sensor untuk mengukur gerak dinamis sebuah benda atau sering disebut sebagai vibrasi dari sebuah benda. Dalam buku ini dibahas akselerometer *3-axis* yang digunakan pada sistem pengukuran percepatan IC tunggal monolitik dengan kemampuan 3 g. Akselerometer berisi sensor *micromachined polysilicon* dan dilengkapi sirkuit pengondisian sinyal untuk mengimplementasikan suatu pengukuran akselerasi arsitektur *open-loop*. *Output* sinyal merupakan tegangan analog yang nilainya sebanding dengan percepatan. Akselerometer dapat mengukur percepatan statis gravitasi dalam *sensing* aplikasi miring serta percepatan dinamis yang dihasilkan dari *shock motion* atau getaran. Blok diagram dari sensor akselerometer yang digunakan terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Blok Diagram Sensor Akselerometer ADXL 330

Sensor ini adalah sebuah struktur *micromachined polysilicon* permukaan yang dibangun di atas silikon wafer. Struktur *Polysilicon springs* ditempatkan di atas permukaan wafer dan menahan kekuatan akselerasi. Defleksi struktur diukur dengan menggunakan kapasitor diferensial yang terdiri dari pelat berbentuk piring yang ditempatkan tetap dan pelat berbentuk piring lain yang melekat pada massa bergerak. Piring tetap didorong oleh gelombang persegi melalui *phase* 180° . Percepatan yang bergerak mengalihkan massa dan kapasitor diferensial yang dihasilkan dalam sebuah output sensor amplitudo sebanding dengan percepatan. Teknik demodulasi fase sensitif kemudian digunakan untuk menentukan besar dan arahnya percepatan. *Output* dari sensor *Micro Electro Mechanic Sensor* (MEMS) dapat dilihat pada Gambar 3.

- Jika rangkaian listrik pada pengukuran akselerometer menggunakan kapasitor, *output*-nya sebanding dengan tegangan kapasitor.
- Jika tidak ada akselerasi, *output* akselerometer akan nol.

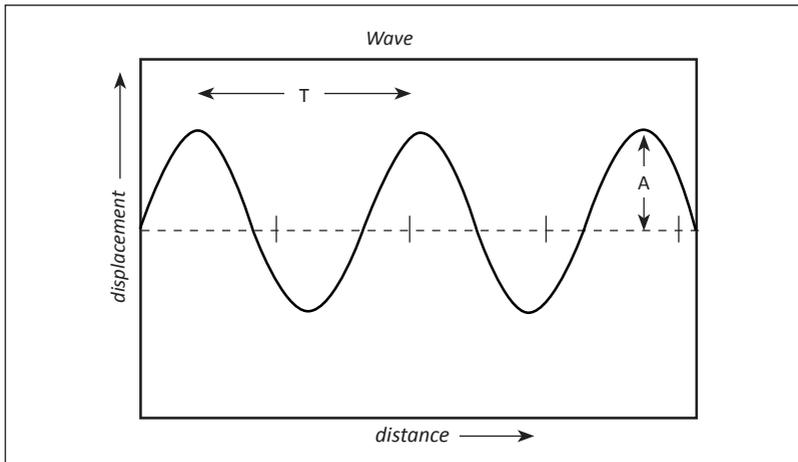


Gambar 3. Sensor MEMS

- c. Jika tegangan yang dihasilkan positif, *output*-nya positif.
- d. Jika kedua tegangan yang dihasilkan positif, *output*-nya positif.
- e. Jika tegangan yang dihasilkan negatif, *output*-nya juga negatif.

Pengukuran vibrasi memerlukan perangkat keras yang terdiri dari sensor, pengubah sinyal analog ke digital, komputer pemroses data, dan perangkat lunak pemrograman pengambilan data akuisisinya yang dilengkapi penampil. Bagian sensor menggunakan akselerometer yang mempunyai spesifikasi hingga $\pm 3g$ ($3 \times 9,8 \text{ m/s}^2$) dengan 3 sumbu, di mana sumbu X dan Y dapat mengukur dengan frekuensi 0,5 Hz sampai 1600 Hz. Sementara itu, sumbu Z dapat mengukur 0,5 Hz sampai 550 Hz. Vibrasi berkereta api yang akan diukur adalah frekuensi rendah di bawah 50 Hz, baik sumbu X, Y, maupun sumbu Z, dengan akselerasi di bawah $\pm 2g$ sehingga akselerometer yang digunakan sudah memenuhi syarat.

Vibrasi adalah suatu gerak periodik yang terjadi apabila benda terkena getaran. Bentuk gerak periodik yang paling sederhana adalah gerak harmonik seperti yang diperagakan pada Gambar 4.



Gambar 4. Gerak Harmonik Getaran

Gerak harmonik sering juga dinyatakan sebagai proyeksi suatu titik yang bergerak melingkar, mempunyai kecepatan tetap pada suatu garis lurus dengan kecepatan sudut sebesar ω , dan perpindahan (*displacement*) sepanjang x . Oleh karena itu, persamaan gerak harmonik dalam kasus ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$x(t) = A \sin \omega t \quad \dots (1)$$

Gelombang gerak harmonik bergerak secara berulang dalam 2π radian sehingga didapat hubungan besaran ω yang diukur dalam radian per detik sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \dots (2)$$

dengan:

T = periode osilasi, (s)

f = frekuensi, (Hz)

Persamaan (1) dapat dianalogikan dengan suatu gelombang getaran yang merambat pada suatu struktur sehingga terjadi simpangan getaran. Dari persamaan, tersebut dapat ditentukan kecepatan getaran (*velocity*) dan percepatan getaran (*acceleration*) dengan menggunakan formula sebagai berikut.

kecepatan getaran atau *velocity*:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad \dots (3)$$

Percepatan getaran atau *acceleration*:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega A \sin \omega t = \omega^2 A \sin(\omega t + \pi) \quad \dots (4)$$

dengan:

x = simpangan getaran, diukur dalam meter (m)

v = kecepatan getaran, diukur dalam meter per detik (m/s)

a = percepatan getaran, diukur dalam meter per detik kuadrat (m/s²)

t = waktu, diukur dalam detik (s)

Dari persamaan tersebut, dapat dilihat bahwa kecepatan getaran mendahului simpangan getaran dengan sudut fase $\frac{\pi}{2}$, sedangkan percepatan getaran mendahului simpangan getaran dengan sudut fase π . Jadi dalam pengukuran getaran, ada tiga kuantitas getaran yang dapat diukur yakni:

1. Simpangan getaran atau *displacement*.
2. Kecepatan getaran atau *velocity*.
3. Percepatan getaran atau *acceleration*.

Output dari sensor akselerometer mempunyai sensitivitas 270 mV/G. Artinya akselerometer akan menunjukkan 270 mV untuk 1 G. Nilai *output* dari akselerometer dibaca oleh perangkat ADC dan selanjutnya diproses dengan menggunakan komputer. Satuan hasil pengukuran menggunakan akselerometer yang terekam dalam satuan mV dapat langsung dikonversi dalam satuan gravitasi (G) dengan membagi dengan besar nilai sensitivitasnya. Oleh karena itu, akan didapat satuan percepatan dengan mengalikan percepatan gravitasi 9,806 m/detik². Percepatan yang didapat dalam satuan m/sekon² seperti berikut.

$$a = G \times 9,806 \text{ m/sekon}^2$$

Untuk menghitung kecepatan, digunakan:

$$v = \frac{a}{2\pi f} (\text{m/sekon}) \quad \dots (5)$$

Untuk menghitung simpangan digunakan:

$$d = \frac{v}{2\pi f} (\text{mm}) \quad \dots (6)$$

C. PENGUKURAN MENGGUNAKAN KAMERA VISION

Pada tahun 2002, IEEE membuat spesifikasi baru yang dapat menggabungkan kelebihan standar 802.11b dengan 802.11a.

Spesifikasi tersebut diberi kode 802.11g, bekerja pada frekuensi 2,4 GHz dengan kecepatan transfer data maksimal 54 Mbps. Peralatan 802.11g kompatibel dengan 802.11b. Sebagai contoh, komputer yang menggunakan *network card* 802.11g dapat memanfaatkan *access point* 802.11b dan sebaliknya.

Standar 802.11b dibuat pada tahun 1999 dengan menggunakan frekuensi 2,4 GHz dan kecepatan transfer data maksimal 11 Mbps. Standar 802.11g dibuat pada tahun 2003 dengan menggunakan frekuensi 2,4 GHz dan dengan kecepatan transfer data maksimal 54 Mbps.

Pada saat standar 809.11b dibuat, istilah Wi-Fi digunakan, dan secara kebetulan peralatan Wi-Fi yang dibuat mengikuti standar 802.11b. Istilah Wi-Fi yang merupakan singkatan dari *Wireless Fidelity* adalah nama lain untuk produk-produk spesifikasi 802.11 yang dibuat oleh Wi-Fi Alliance. Wi-Fi Alliance adalah organisasi non-profit yang mengeluarkan sertifikat peralatan *wireless LAN*. Produk-produk yang diberi logo Wi-Fi CERTIFIED telah terbukti dapat bekerja atau kompatibel dengan produk buatan vendor lain sehingga pengguna tidak ragu-ragu memilikinya.

Kamera yang digunakan untuk mendeteksi kondisi rel kereta adalah kamera yang dilengkapi fasilitas Wi-Fi yang mudah digeser, dan dibongkar pasang untuk mendapatkan gambar yang terbaik sesuai keinginan. Kamera Wi-Fi yang digunakan mempunyai kemampuan resolusi 2 MP, MPEG-4, *frame rate* 30fps. Kamera ini juga dilengkapi lampu inframerah sehingga dapat melihat dalam gelap.

Kamera bekerja berdasarkan *wireless LAN Access Point*, artinya kamera yang digunakan bertugas menghubungkan koneksi beberapa peralatan Wi-Fi, *Access Point* dapat dianalogikan sebagai hub yang dapat diakses oleh beberapa perangkat yang dilengkapi fasilitas Wi-Fi.

Tabel 1. Perbandingan Perangkat 802.11 a/b/g

	802.11 a	802.11 b	802.11 g
Kompatibilitas	IEEE 802.11 a Wi-Fi CERTIFIED	IEEE 802.11 b Wi-Fi CERTIFIED	IEEE 802.11 b dan g Wi-Fi CERTIFIED
Jumlah Channel	4 atau 8 <i>non-overlapping</i>	3 <i>non-overlapping</i>	3 <i>non-overlapping</i>
Jangkauan dalam ruang tertutup	40 ft (12 m) @ 54 Mbps 300 ft (91 m) @ 6 Mbps	100 ft (30 m) @ 11 Mbps 300 ft (91 m) @ 1 Mbps	100 ft (30 m) @ 54 Mbps 300 ft (91 m) @ 1 Mbps
Jangkauan di area terbuka	100 ft (30 m) @ 54 Mbps 1000 ft (305 m) @ 6 Mbps	400 ft (120 m) @ 11 Mbps 1500 ft (460 m) @ 1 Mbps	400 ft (120 m) @ 54 Mbps 1500 ft (460 m) @ 1 Mbps
Kecepatan transfer data	54, 48, 36, 24, 18, 12, 8 dan 6 Mbps	11, 5.5, 2 dan 1 Mbps	54, 48, 36, 24, 18, 12, 8 dan 6 Mbps
Teknik modulasi	OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 5 Ghz	DSS, Direct Sequence Spread menggunakan CCK, Complementary Code Keying, 2,4 GHZ	OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 2,4 Ghz

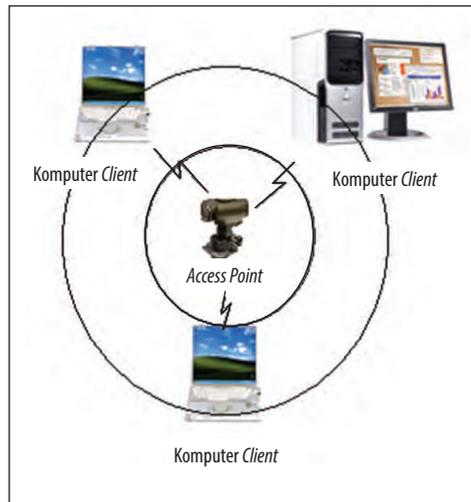
Untuk dapat memilih dan menentukan Wi-Fi yang sesuai dengan kebutuhan, dapat dilihat pada Tabel 1.

Pemanfaatan kamera dalam pendeteksian kondisi rel kereta api dapat dilakukan berdasarkan berbagai kebutuhan, misalnya mendeteksi kemiringan rel kereta dapat dilakukan bila dipadukan dengan pengukuran inersia dari sensor akselerometer, mendeteksi profil rel kereta dapat dilakukan bila dipadukan dengan hasil pemrosesan gambar, atau dapat juga digunakan untuk mendeteksi kerusakan fisik rel yang diakibatkan bencana alam atau kejadian lainnya. Selain kamera Wi-Fi, dapat pula digunakan kamera analog atau sering disebut kamera CCTV. Namun untuk dapat digunakan pada komputer, biasanya kamera CCTV harus dilengkapi dengan *driver*.

Penggunaan kamera Wi-Fi dimaksudkan untuk mempermudah dalam menempatkan kamera agar didapat gambar yang dikehendaki. Dengan digunakannya Wi-Fi, pengguna tidak akan terkendala kabel yang mengurangi keleluasaan ketika menempatkan kamera.

Kamera Wi-Fi pada sistem pengukuran berperan sebagai *Access Point* yang perannya mirip seperti *server*, sedangkan komputer yang mengambil gambar dari kamera berfungsi sebagai *client*. Komputer dapat mengambil gambar dari kamera Wi-Fi seperti komputer *client* mengambil data dari komputer *server*. Pengambilan gambar dari kamera Wi-Fi tidak terbatas hanya oleh satu komputer, tetapi dapat dilakukan beberapa komputer sekaligus. Ilustrasi pemanfaatan kamera Wi-Fi pada beberapa komputer dapat dilihat pada Gambar 5.

Untuk mendeteksi adanya kerusakan fisik rel yang diakibatkan bencana alam atau kejadian lainnya, dipasang kamera dengan pandangan terjauh sampai dengan 1 km. Pada jarak ini kereta masih



Gambar 5. Ilustrasi Pemanfaatan Kamera Wi-Fi pada Beberapa Komputer

dapat mengantisipasi dengan pengereman atau bahkan dapat melihat gejala terjadinya bencana yang akan terjadi dengan memperhatikan perubahan-perubahan yang terjadi pada alam. Penempatan kamera untuk mendeteksi keadaan ini cukup spesifik sehingga diperlukan pembahasan tersendiri pada Bab 5.

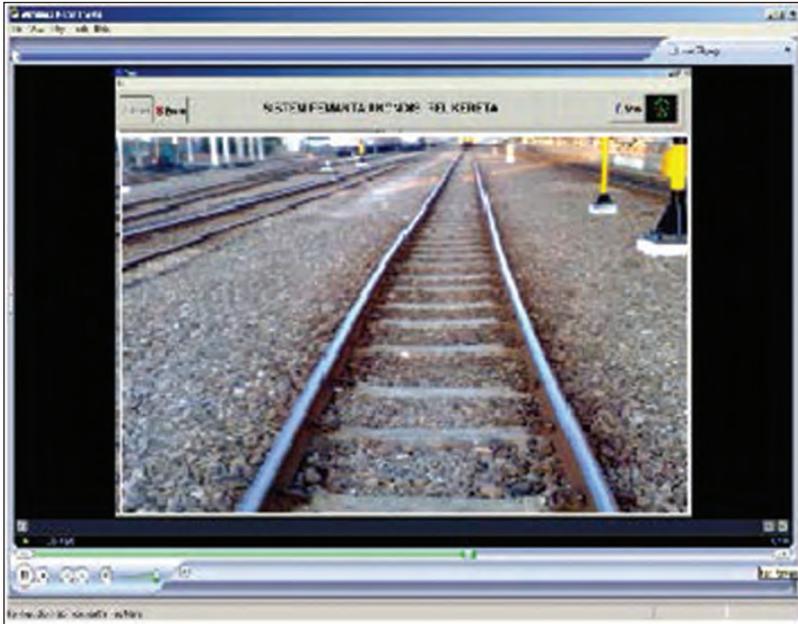
Pengambilan data standar dapat dilakukan dengan cara menginstal perangkat lunak yang diberikan saat pembelian kamera—biasanya hanya sesuai untuk spesifikasi kamera yang digunakan. Dalam pendeteksian terintegrasi, tayangan yang ditampilkan merupakan gabungan antara kamera dengan hasil pengukuran perangkat lain sehingga dapat menggunakan perangkat lunak tambahan jika diperlukan.

Fungsi perangkat lunak adalah menata semua parameter yang diukur menjadi sebuah tampilan yang dapat menggabungkan informasi keadaan sesungguhnya terhadap media yang dideteksi. Dalam buku ini, yang menjadi fokus pendeteksian adalah kondisi rel kereta. Perangkat lunak yang digunakan adalah Builder C⁺⁺. Hasil pengamatan menggunakan kamera Wi-Fi, ditampilkan menggunakan perangkat lunak Builder C⁺⁺ dapat dilihat pada Gambar 6.

Dengan menggunakan kamera Wi-Fi, kamera dapat mudah diposisikan pada tempat yang sesuai dan *rigid* agar pengamatan dapat dilakukan dengan baik. Penempatan kamera dilakukan dengan membuat dudukan kamera di beberapa tempat yang strategis dan aman dari benturan.

Peralatan Wi-Fi yang melengkapi fasilitas kamera Wi-Fi dan sering digunakan sebagai fasilitas distribusi adalah Wi-Fi Adapter, *Access Point*, dan Antena.

Wi-Fi Adapter digunakan untuk membangun WLAN, yang setara dengan ethernet card yang bekerja menggunakan gelombang radio.



Gambar 6. Hasil Pengamatan Saat Uji Coba di Bandung Menggunakan Kamera Wi-Fi

Access Point dapat dianalogikan sebagai *hub* atau *repeater* pada *wired LAN*. *Access point* dapat menerima dan meneruskan sinyal dari dan ke berbagai peralatan Wi-Fi.

Antena dapat digunakan untuk komunikasi Wi-Fi pada jarak yang cukup jauh. WLAN yang diperluas jangkauannya menggunakan antena sering disebut dengan eksternal WLAN.

Seluruh tayangan WI-FI dapat disimpan sebagai data pendeteksian. Lama pengamatannya bergantung pada kapasitas penyimpan data dan kualitas rekaman data.

BAB 3

FUNGSI GPS DALAM PEMERIKSAAN REL

GPS di Indonesia biasanya hanya digunakan sebagai alat bantu untuk menunjukkan arah dan lokasi sebuah daerah. GPS yang digunakan di wilayah Indonesia terdiri dari berbagai jenis, namun belum ada ratifikasi penggunaan GPS untuk wilayah sekitar Indonesia. Oleh karena itu, ketelitian pengukuran menggunakan GPS di wilayah Indonesia sering diperdebatkan keakuratannya. *Global Positioning System* (GPS) adalah sistem untuk menentukan posisi dan navigasi secara global dengan menggunakan satelit. Sistem ini dikenal dengan nama sistem *GPS/Navigation Satelit Timing and Ranging Global Positioning System* (NAVSTAR GPS). GPS terdiri dari tiga segmen, yaitu: satelit, pengontrol, dan penerima/pengguna. Satelit GPS yang mengorbit bumi, dengan orbit dan kedudukan yang tetap, seluruhnya berjumlah 24 satelit—21 aktif dan 3 sisanya sebagai cadangan.

GPS digunakan untuk melakukan aktivitas pengukuran. Hal yang akan dijelaskan dalam bab ini adalah pengukuran menentukan posisi dan pengukuran kecepatan kereta api, yang keduanya menggunakan GPS.

A. MENENTUKAN POSISI MENGGUNAKAN GPS

Untuk mewujudkan transportasi kereta yang andal, dibutuhkan perangkat pendeteksi lalu lintas kereta api yang terpusat dengan perangkat yang memadai. Banyak teknologi yang menunjang perkembangan perkeretaapian. Salah satunya adalah metode *tracking* yang dilengkapi fasilitas kontrol untuk pengaturan sinyal dan sarana komunikasi data yang memadai atau sering disebut dengan manajemen transportasi. Peta perjalanan kereta api mutlak dibutuhkan untuk mendeteksi, mengontrol, dan mengatur sinyal secara akurat. Oleh karena itu, survei letak jalan kereta api (*way point*) harus dilakukan. Pengukuran *way point* menggunakan GPS yang dihubungkan dengan komputer jinjing dilengkapi perangkat lunak pengukuran (*client*) dan perangkat lunak *monitoring* dan penyimpanan data (*server*). Kemudian data disimpan dalam bentuk format basis data menggunakan perangkat lunak Excel yang mudah diproses untuk kepentingan analisis.

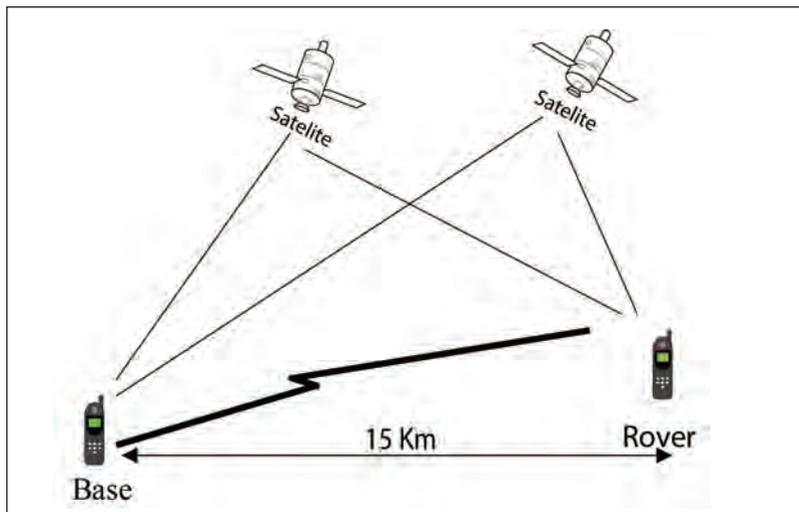
Pengukuran *way point* dimaksudkan untuk mendapatkan data letak koordinat *latitude* dan *longitude* lajur kereta api di setiap titiknya. Semakin banyak data *way point* yang didapat dalam satu lajur kereta maka akan semakin baik. Pengukuran *way point* dilakukan dalam interval pengukuran satu detik. Pengukuran dilakukan di atas kereta api yang sedang berjalan yang menginterpretasikan pengukuran di jalur kereta api dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Manggarai (sejalan dengan proposal insentif Ristek). Dengan laju kereta api rata-rata 60 km/jam, titik *way point* yang didapat adalah kira-kira setiap selang 16,7 meter. *Way point* yang didapat dari hasil pengukuran dimasukkan pada basis data pengukuran menggunakan perangkat lunak *Excel*. Data selanjutnya digunakan sebagai data lajur kereta api untuk pembuatan peta digital guna memonitor perjalanan kereta api dengan metode *tracking*.

Pengukuran menggunakan GPS dapat dilakukan dengan dua kriteria, yaitu akurasi rendah dan akurasi tinggi. Pengukuran dengan akurasi rendah mempunyai kesalahan berkisar 22 m dan untuk akurasi tinggi kesalahan terbesar tidak lebih dari 1 meter. Dalam pengoperasiannya, GPS dibantu oleh 4 satelit bahkan lebih yang dapat menjangkau seluruh dunia. Pada awalnya, pengukuran posisi memerlukan waktu 15 sampai 20 detik sehingga perangkat GPS hanya dapat digunakan untuk kebutuhan survei dan kegiatan *monitoring* lainnya dengan kecepatan relatif rendah.

Ada metode untuk meningkatkan ketelitian GPS, yaitu pengukuran *real time* (RTK), dengan ketelitian GPS dapat ditingkatkan hingga di bawah 1 meter dan waktu akses 1 detik, dengan syarat:

1. Survei antara titik ukur berjarak tidak boleh lebih dari 15 km.
2. Memungkinkan untuk pengukuran *real time*.
3. Propagasi radio *line of sight*.

Pengukuran *real-time* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengukuran *Real Time* (El Rabany 2002)

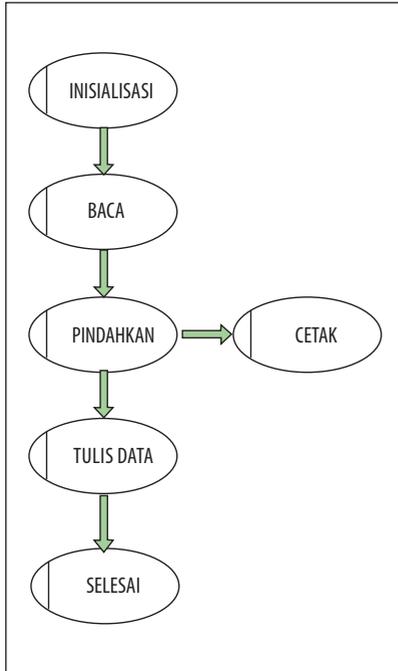
Teknologi GPS mengalami perkembangan pesat, baik kecepatan pemrosesan maupun ketepatan pengukurannya. Teknologi GPS kini banyak digunakan di berbagai bidang, utamanya untuk survei dan *tracking*.

Jika GPS digunakan sebagai alat pengukur *way point* lajur kereta api, untuk menyimpan data GPS sepanjang lajur kereta dari Serpong sampai Manggarai dibutuhkan perangkat penyimpan data dengan kemampuan yang cukup besar. Untuk memudahkan pengukuran maka dipilihlah komputer jinjing (laptop) sebagai sarana pengukur dan sekaligus penyimpan data pengukuran *way point*. Untuk dapat membaca data *way point* dari GPS, komputer jinjing harus dikondisikan sedemikian rupa sehingga GPS dan komputer jinjing dapat berinteraksi satu sama lain.

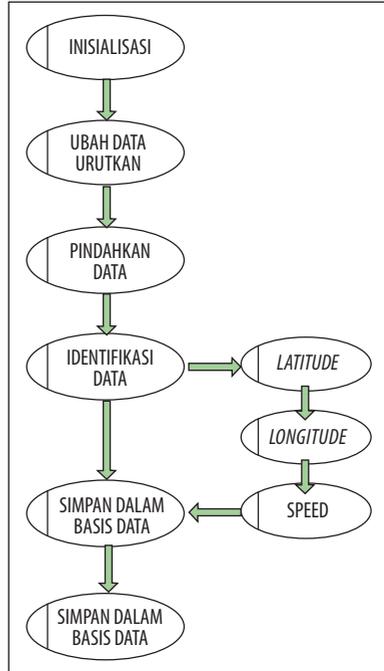
Penghubung antara GPS dan komputer jinjing (*driver*) merupakan pintu masuk data *way point* hasil pengukuran. Teknologi GPS yang digunakan adalah Franson GPS Gate versi 2.5.

Untuk memfungsikan komputer jinjing sebagai alat pengambil data hasil pengukuran GPS, dibuatlah perangkat lunak yang dapat membaca setiap perubahan yang terjadi pada GPS. Perangkat lunak itu disebut perangkat lunak *client*. Perangkat lunak *client* dibuat dengan menggunakan perangkat lunak Phiton yang dapat digunakan dengan bebas (*open source software*). Lewat program ini, komputer jinjing dapat mengambil data dari GPS. Format data yang terbaca pada program *client* sama dengan format data pada GPS ditambah dengan waktu pengambilan data. Urutan pemrograman *client* dapat dilihat pada Gambar 8.

Pemrosesan data hasil pengukuran dari komputer *client* (menjadi data yang dapat ditampilkan pada komputer *server* dengan format excel dan disimpan dalam bentuk format basis data pengukuran, serta dapat diproses untuk digunakan sebagai data informasi) dilakukan



Gambar 8. Urutan Program GPS Client



Gambar 9. Urutan Program GPS Server

dengan menggunakan program *server* pada pusat pengontrol data. Aliran data disimpan dalam bentuk basis data dengan parameter pengukuran yang disimpan meliputi waktu pengiriman, tanggal, *longitude*, *latitude*, dan kecepatan. Program *server* dibuat menggunakan perangkat lunak python dengan urutan pemrograman seperti terlihat pada Gambar 9.

Program ini dapat menerima data hasil pengukuran secara terus-menerus dengan interval waktu 1 detik. Tampilan data hasil pengukuran program GPS *server* ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada pengoperasiannya, GPS dibantu oleh satelit yang dapat menjangkau seluruh dunia. Dalam penelitian ini, pengukuran posisi memerlukan waktu akses 1 detik sehingga perangkat GPS

Tabel 2. Tampilan Data Hasil Pengukuran Program GPS Server

BL/TG/TH	Waktu	Sample	Latitude	Longitude	Kec.
12/15/12	01:50:38	118	654.8438	10735.95	0,26
12/15/12	01:50:38	118	654.8438	10735.95	0,26
12/15/12	01:50:38	120	654.8438	10735.95	0,26
12/15/12	01:50:38	120	654.8438	10735.95	0,26
12/15/12	01:50:38	122	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:38	122	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	124	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	124	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	126	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	126	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	128	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	128	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	130	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:39	130	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:40	132	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:40	132	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:40	134	654.8437	10735.95	0,71
12/15/12	01:50:40	134	654.8437	10735.95	0,71

dapat digunakan untuk kebutuhan survei dan kegiatan *monitoring* lainnya dengan kecepatan relatif sedang. Untuk kegiatan *monitoring* dengan kecepatan tinggi (peluncuran roket), perangkat ini masih terus dikembangkan.

GPS yang telah dilengkapi dengan antena untuk mempertahankan sinyal satelit mempunyai *output* berupa data *way point*. Data *way point* dikirimkan ke komputer jinjing menggunakan fasilitas USB.

Perangkat komputer jinjing yang digunakan telah dilengkapi dengan *driver Franson GPS Gate versi 2.5* dan perangkat lunak *client*

serta *server*. Perangkat lunak *client* bertanggung jawab terhadap mode pengukuran. Perangkat lunak *server* melakukan aktivitas basis data, mengambil data dan menampilkan data. Pada tingkat *server*, data yang masuk ditampilkan dalam bentuk tabel basis data menggunakan perangkat lunak Excel. Selain disimpan dalam bentuk basis data, data pengukuran dapat pula dipantau dengan menggunakan peta digital yang tersedia pada GPS dengan mengaktifkan Map Edit. Sementara itu, data hasil pengukuran dapat ditampilkan dalam format tabel seperti yang terlihat pada Tabel 2. Ilustrasi pengukuran *way point* menggunakan komputer jinjing dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengukuran *Way Point* Menggunakan Komputer

Pengukuran *way point* dari stasiun Serpong sampai Manggarai menghasilkan data *way point* sebanyak sekitar 4.000 baris atau sekitar 50 halaman yang disajikan dalam bentuk basis data pengukuran dalam format seperti pada Tabel 2. Selanjutnya, ini akan digunakan untuk membuat lajur kereta api yang dipadukan pada peta digital. Hasil pengukuran *way point* untuk setiap stasiun dengan mencuplik hasil pengukuran *way point* dari Stasiun Serpong sampai Manggarai dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengukuran *Way Point* Stasiun dari Serpong sampai Manggarai

Nama Stasiun	Text Latitude	Latitude Utara-Selatan	Text Longitude	Longitude Timur-Barat
Serpong Lajur 3	06.19.210	S	106.39.909	E
Serpong Lajur 3	06.19.213	S	106.39.909	E
Rawa Buntu	06.18.901	S	106.40.566	E
Sudimara	06.17.805	S	106.42.781	E
Pondok Ranji	06.16.590	S	106.46.968	E
Kebayoran	06.14.198	S	106. 46.968	E
Pal Merah	06.12.419	S	106.47.862	E
Tanah Abang	06.11.080	S	106.48.645	E
Manggarai	06.12.624	S	106.51.026	E

Data hasil pengukuran *way point* dengan menggunakan GPS dapat dikirimkan ke *server* dan disimpan di *server* sebagai basis data—dalam pengukuran ini, komputer jinjing difungsikan sebagai *server*. Basis data hasil pengukuran dapat diakses bila diperlukan dan digunakan untuk kebutuhan pembuatan lajur kereta dalam bentuk peta digital. Pembuatan peta digital membutuhkan perangkat lunak. Perangkat lunak yang digunakan adalah Builder C⁺⁺. Fungsinya bukan hanya menampilkan peta digital pada layar monitor, tetapi juga membuat tampilan lajur kereta api menjadi interaktif. Ilustrasi pembuatan peta digital untuk letak stasiun-stasiun dari Stasiun Serpong sampai Manggarai dapat dilihat pada Gambar 11.

Peta digital digunakan untuk melakukan *tracking* perjalanan kereta api secara interaktif. Peta digital yang digunakan sebaiknya menggunakan peta digital hasil survei. Hal ini untuk menghindari perbedaan hasil pengukuran antara hasil survei dengan jalur yang telah ada pada peta digital hasil pemotretan udara. Apabila perbedaan ini terjadi, akan terlihat bahwa hasil *tracking* yang dilakukan terhadap jalur pada peta digital tidak sinkron dengan hasil survei pengukuran *way point*.



Gambar 11. Letak Stasiun-stasiun dari Stasiun Serpong sampai Manggarai pada Peta Digital

Peta digital bagi pengamatan dengan jalur tetap seperti *tracking* kereta api sebaiknya menggunakan peta digital hasil survei *way point*. Pada setiap titik tertentu (paling tidak setiap 15 km) ditempatkan sebuah GPS yang berfungsi sebagai *base* yang mengoreksi ketelitian GPS di dalam kereta api. Dengan cara ini ketelitian GPS selalu terjaga dan jika GPS yang berada di dalam kereta api mengalami penyimpangan pengukuran maka dapat dibuat sebuah peringatan untuk mengganti GPS yang mengalami gangguan. Apabila keadaan ini dapat dipertahankan, keakuratan pengukuran terus dapat dimonitor dari waktu ke waktu. Penyimpangan pengukuran posisi kereta pun tidak akan pernah terjadi. Metode seperti itu disebut *Differential Global Positioning System* (DGPS), yakni sebuah sistem atau cara untuk meningkatkan kemampuan GPS dengan menggunakan stasiun darat yang memancarkan koreksi lokasi. Dengan sistem ini, alat navigasi

menerima koreksi dan memasukkannya ke dalam perhitungan sehingga akurasi alat navigasi tersebut akan meningkat. Namun, karena menggunakan stasiun darat, sinyal tidak dapat mencakup area yang luas.

B. PEMANTAUAN KECEPATAN KERETA API MENGGUNAKAN GPS

Dalam sebuah perjalanan kereta api, kecepatan dan posisi kereta api mutlak diketahui. Hal itu untuk menunjang ketepatan perjalanan kereta api yang merupakan salah satu tolok ukur keberhasilan pengelolaan jasa kereta api.

Dengan ketelitian yang semakin baik dan waktu akses yang semakin cepat, kepresisian pengukuran pun menjadi lebih baik. Untuk dapat mendeteksi perjalanan kereta api secara terpusat, GPS dilengkapi dengan pengiriman data yang menggunakan teknologi GIS dan komunikasi data menggunakan teknologi GPRS.

1) Pengukuran Kecepatan Menggunakan GPS

Salah satu fungsi GPS adalah sebagai perangkat pengukur kecepatan dengan menggunakan perubahan data posisi koordinat bumi yang diperoleh dari satelit GPS dan diolah prosesor menjadi informasi kecepatan. Pengukuran kecepatan dilakukan dengan mengurangi pengukuran posisi awal dengan pengukuran posisi akhir, kemudian dibagi dengan selisih waktu pengukuran awal dengan akhir atau:

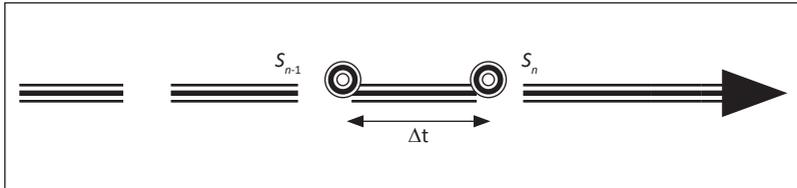
$$\text{Kecepatan}(v) = \left| \frac{S_n - S_{n-1}}{\Delta t} \right| \quad \dots (7)$$

dengan:

S_n = Posisi terakhir

S_{n-1} = Posisi sebelumnya

Dengan rumus di atas, kecepatan selalu dapat ditampilkan jika kereta api mengalami pergerakan. Ketelitian pengukuran kecepatan bergantung pada ketelitian saat penetapan posisi GPS. Oleh karena itu, kecepatan akses dan ketepatan pada saat penetapan posisi GPS menjadi tolok ukur keberhasilan pengukuran kecepatan kereta api menggunakan GPS. Ilustrasi penetapan posisi menggunakan GPS dapat dilihat pada Gambar 12.

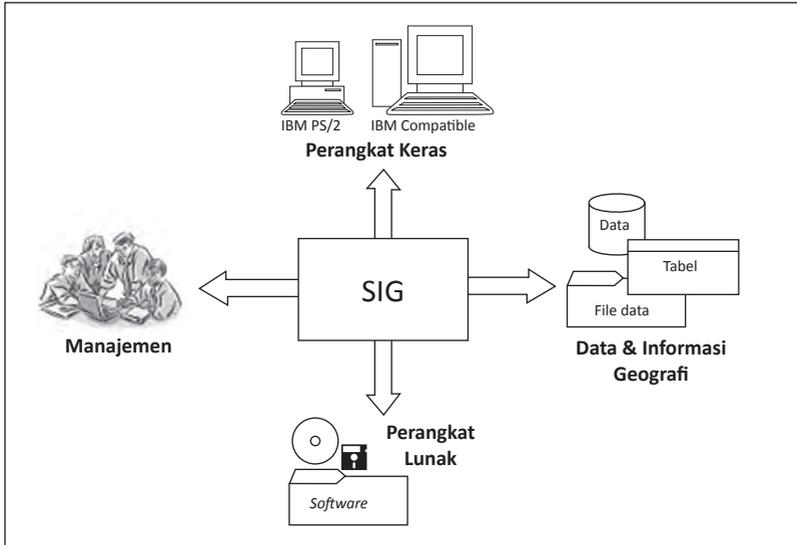


Gambar 12. Ilustrasi Pengukuran Kecepatan dengan GPS

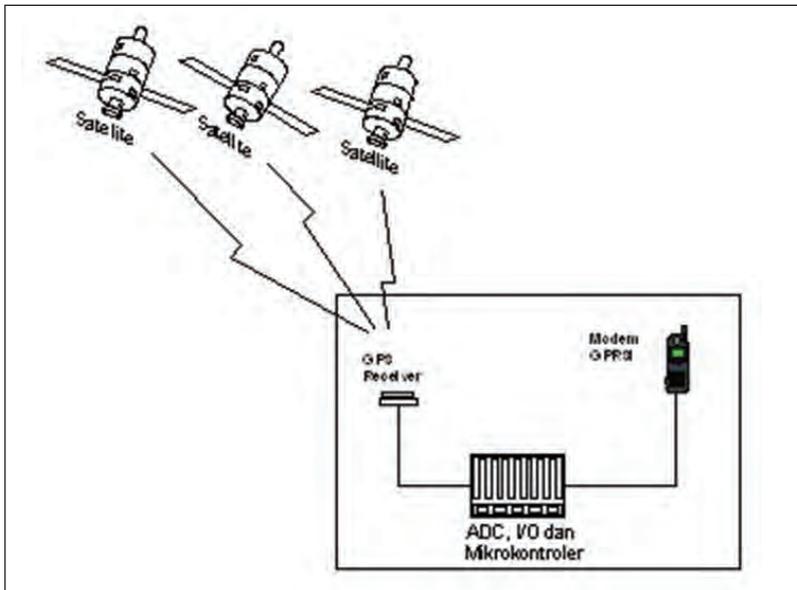
2) Pemantauan Kecepatan kereta api secara Online

Dengan peta digital, kecepatan kereta api dapat langsung dipantau lewat gambar peta tersebut secara interaktif. Peta digital dapat diperbaharui sewaktu-waktu dengan mudah sehingga keadaan *real* perjalanan kereta dapat diketahui secara akurat. Dengan didukung perangkat lunak *Geographical Information System* (GIS) dan pembuatan Sistem Informasi Geografi menggunakan komputer seperti pada Gambar 13, data pengukuran lapangan langsung dapat diketahui. Peta perjalanan kereta api pun dapat ditampilkan secara interaktif.

Pengukuran secara *online* memerlukan perangkat yang dipasang di lapangan dan perangkat *monitoring* pada stasiun pengamat. Perangkat lapangan terdiri dari sensor (perangkat GPS *receiver*), ADC, I/O berbasis mikrokontroler, dan Modem GPRS+ Antena seperti pada Gambar 14.



Gambar 13. Pembuatan Sistem Informasi Geografi



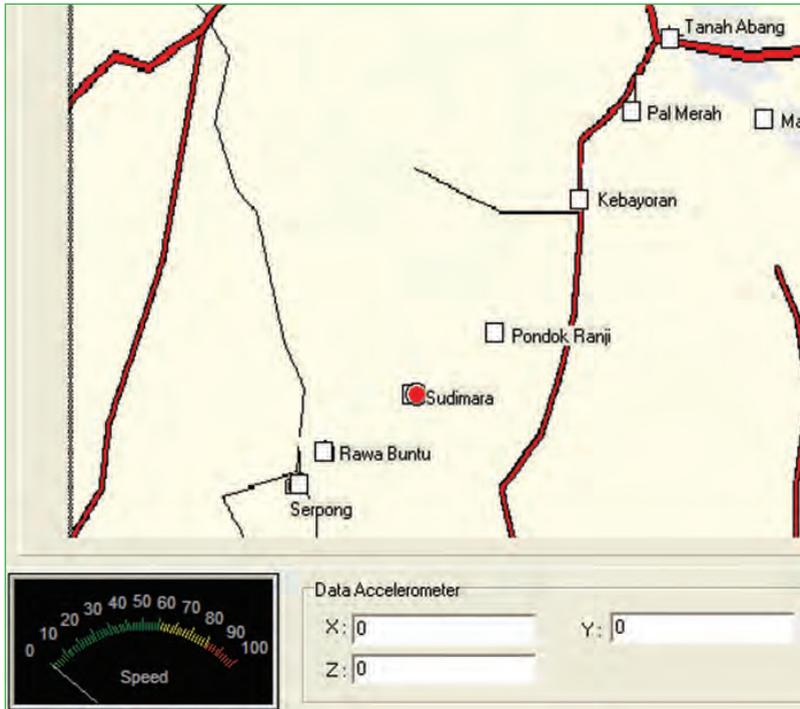
Gambar 14. Perangkat Pengukur Kecepatan Menggunakan GPS

Perancangan sisi perangkat VTS (*Vehicle Tracking System*) berbasis mikrokontroler dan perancangan perangkat lunak antarmuka GPS dan *Mobile Computing* menggunakan Lab View, Builder C++ dan Phyton yang akan dimasukkan ke mikrokontroler.

Perangkat *monitoring* pada stasiun pengamat terdiri dari sebuah komputer yang dihubungkan dengan modul GPRS melalui *port* USB. Posisi kereta api divisualisasikan lewat peta digital dan pengembangan perangkat lunak yang terdiri dari Builder C++ dan software Lab View dan Phyton.

GPRS dipilih sebagai sarana pengiriman data karena biayanya sangat murah. Tarif dikenakan berdasarkan besarnya data dalam *kilobyte*, berkisar antara 7 hingga 12 rupiah bergantung *provider* yang dipilih. Komunikasi data mentah relatif kecil sehingga pemilihan GPRS dianggap paling ekonomis. Bahkan dalam pemrograman digunakan perangkat lunak phyton, perangkat lunak bebas akses, sebagai antisipasi diberlakukannya *open source* dengan pembebasan tarif untuk pengguna.

Dengan menggunakan perangkat lunak builder C++ yang mendeteksi di atas kereta api, pergerakan kereta api dari satu stasiun ke stasiun lainnya dan besar kecepatan kereta api dapat diketahui sejalan lajunya kereta api. Besarnya kecepatan yang diukur menggunakan GPS dapat dibandingkan dengan kecepatan kereta api yang ditunjukkan pada *speedometer* kereta api. Tampilan pengukur kecepatan menggunakan GPS dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Tampilan Pengukur Kecepatan Menggunakan GPS pada Komputer Saat Pengukuran *Tracking* Kereta Api

BAB 4

MENDETEKSI REL MENGUNAKAN AKSELEROMETER

Pengukuran getaran menggunakan akselerometer dimaksudkan untuk mendeteksi kerusakan yang terjadi pada rel kereta api, sekaligus mendapatkan nilai frekuensi yang mewakili getaran yang berasal dari rel kereta api. Tujuannya untuk menentukan frekuensi kerja alat pendeteksi kerusakan atau gangguan yang disebabkan oleh kondisi *real time* rel kereta api. Alat pendeteksi kerusakan atau gangguan rel kereta api juga digunakan untuk mendeteksi kondisi rel kereta api untuk melengkapi fungsi JPJ yang ditempatkan di atas lori. Alat ini dapat juga ditempatkan di atas kereta api. Selain itu, alat ini dapat juga digunakan untuk peringatan dini kondisi rel kereta api dan sebagai informasi untuk melakukan pemeliharaan preventif.

Pengaplikasian sistem pengukuran menggunakan akselerometer yang akan dijelaskan dalam bab ini adalah mendeteksi kemiringan rel, mendeteksi simpangan arah pada sumbu X, mendeteksi simpangan arah pada sumbu Y, dan mendeteksi simpangan arah pada sumbu Z. Pengetahuan dasar sensor akselerometer dalam aplikasi pengukuran di tiap-tiap sumbu dimaksudkan untuk mengetahui petunjuk kerja dan faktor-faktor pendukungnya. Selanjutnya, ini dapat digunakan untuk menginterpretasikan hasil rekaman dari akselerometer yang bersangkutan.

Pembahasan dicontohkan dalam beberapa aplikasi pengukuran disertai analisis karakteristik getaran untuk masing-masing hasil pengukuran. Analisis hasil pengukuran dititikberatkan terhadap masalah rel kereta api karena berdampak pada tingkat keselamatan dan kenyamanan para penumpang kereta api.

A. MENDETEKSI KEMIRINGAN REL

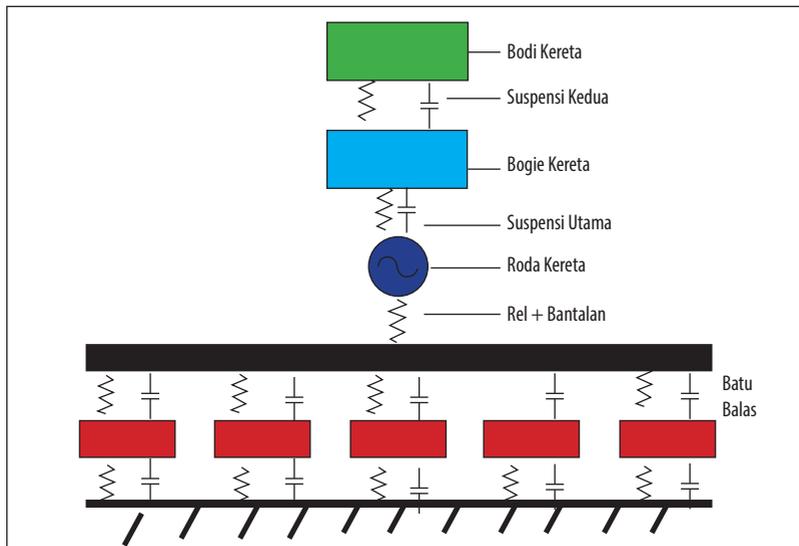
Keadaan alam Indonesia terdiri atas bebatuan lempung yang relatif lembek dan banyaknya perbukitan gundul. Jika terkena hujan dengan intensitas yang cukup tinggi, struktur tanah dapat berubah menjadi labil dan sering kali menimbulkan longsor. Kondisi seperti ini sangat rawan bagi lintasan kereta api, khususnya di wilayah Jawa Barat yang curah hujannya cukup tinggi. Di sana banyak rel kereta api yang miring karena perubahan alam atau sengaja dibuat miring untuk menyesuaikan daerah yang dilaluinya.

Pengukuran kemiringan rel kereta api pada saat pemeriksaan oleh JPJ berbeda dengan pengukuran yang dilakukan di atas kereta api. Pengukuran di atas kereta api dilakukan pada saat kereta api berjalan. Kemiringan yang terjadi merupakan gabungan dari sistem suspensi yang terdiri atas rel, bantalan, dan balas digabung dengan sistem suspensi *boggy*, pegas dan *softbraker* serta sistem suspensi gerbong, *castor* serta *mounting*-nya seperti yang terlihat pada Gambar 16.

Kemiringan total diukur pada saat gerbong dibebani penumpang, dan tidak boleh lebih dari 15° . Pengukuran kemiringan dilakukan dengan menggunakan sensor akselerometer tiga sumbu yang digabungkan dengan hasil tampilan dari kamera. Kemiringan yang terjadi dapat diamati langsung pada layar monitor. Untuk dapat mengukur kemiringan rel kereta api, diperlukan akselerometer yang mempunyai resolusi tinggi sehingga sinyal kecil yang terjadi dapat terdeteksi. Pada penelitian ini digunakan akselerometer tiga sumbu dengan resolusi 270 mV/G.

Pengukuran data kemiringan kereta api pada saat kereta berjalan menggunakan sensor akselerometer, GPS, kamera CCTV, dan komputer jinjing dengan *delay* pengukuran satu detik. Pada saat mengukur tingkat kemiringan, posisi diukur pula menggunakan GPS sehingga daerah yang nyaman dan daerah yang miring selama perjalanan berkereta api dapat diketahui. Ilustrasi sistem suspensi gabungan dapat dilihat pada Gambar 16.

Pemanfaatan kamera untuk mendeteksi kemiringan rel yang dipadukan dengan pengukuran inersia menggunakan bantuan sensor akselerometer. Pendeteksian inersia berupa kemiringan rel menggunakan akselerometer tiga sumbu yang digabungkan dengan hasil rekaman dari kamera. Pengukuran kemiringan dilakukan bersamaan dengan pengambilan gambar dan ditampilkan secara bersamaan pula sehingga kondisi terkini kemiringan rel dapat terdeteksi, ditampilkan, dan disimpan dalam basis data pengukuran kondisi rel kereta.



Gambar 16. Ilustrasi Sistem Suspensi Gabungan (Esveld 2001)

Teknik Pengukuran Kemiringan dijelaskan sebagai berikut.

- Akselerometer dalam keadaan normal dicatat tegangannya (V_0), kemudian dimiringkan ke kanan sampai 90° , tercatat tegangannya V_p . Kemudian, dari keadaan normal dimiringkan ke kiri tercatat tegangannya V_n .
- Untuk menghitung besarnya kemiringan yang terjadi, digunakan rumus sebagai berikut.

Kemiringan ke kanan:

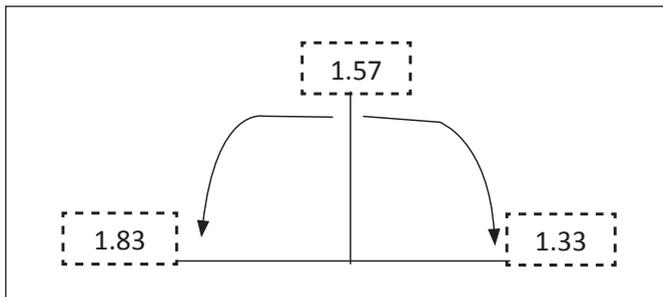
$$Kkn = \frac{Vkn - V_0}{Vp - V_0} \times 90^\circ \quad \dots (8)$$

Kemiringan ke kiri:

$$Kkr = \frac{Vkr - V_0}{Vn - V_0} \times 90^\circ \quad \dots (9)$$

Untuk mendapatkan tegangan referensi pada saat akselerometer dimiringkan, dilakukan karakterisasi akselerometer tersebut terhadap kemiringan 90° ke kiri dan kemiringan 90° ke kanan. Hasil karakterisasi akselerometer ditunjukkan pada Gambar 17.

Data hasil pengukuran seperti pada Gambar 17 kemudian diproses menggunakan persamaan (8) untuk pergerakan kemiringan ke arah kanan, dan menggunakan persamaan (9) untuk pergerakan kemiringan ke arah kiri. Data kemiringan ke arah kiri maupun ke-



Gambar 17. Hasil Pengukuran Nilai Tegangan untuk Kemiringan Akselerometer 90° ke Kiri dan Kemiringan 90° ke Kanan pada Arah Y

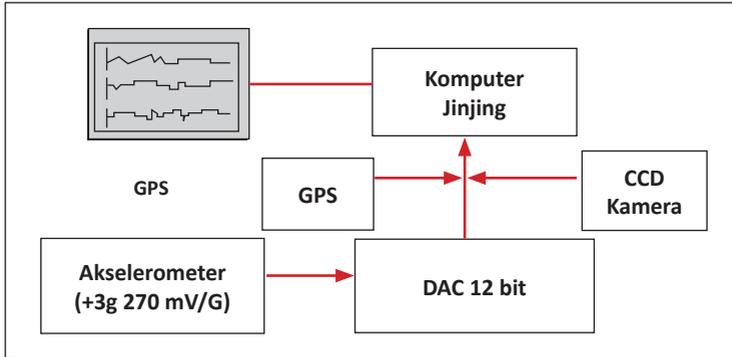
miringan ke arah kanan digabungkan dengan hasil Perekaman menggunakan kamera CCTV dan diproses menggunakan perangkat lunak Builder C++ sehingga terlihat hasil seperti pada Gambar 18. Percobaan pengukuran kemiringan dilakukan dengan membandingkan *set point* pengukuran berupa busur derajat pada unit sensor yang tidak terlihat dalam gambar dengan penunjukan di layar monitor. Hasil kemiringan berupa tanda silang, sedangkan gambar belakang sebagai bidang lurus.

Hardware atau alat untuk mendeteksi tingkat kemiringan kereta api terdiri dari dua bagian, yaitu bagian sensor dan data akuisisinya dan bagian penampil. Blok diagram algoritma pengukuran kemiringan kereta saat berjalan dapat dilihat pada Gambar 19.

Akselerometer yang digunakan mempunyai spesifikasi hingga $\pm 3g$ ($3 \times 9,8 \text{ m/s}^2$) dengan 3 sumbu, sumbu X dan Y dapat mengukur dengan frekuensi 0,5 Hz sampai 1600 Hz dan untuk sumbu Z dapat mengukur 0,5 Hz sampai 550 Hz. Dalam aplikasinya, selain untuk



Gambar 18. Tampilan Hasil Pengukuran Kemiringan Menggunakan Akselerometer



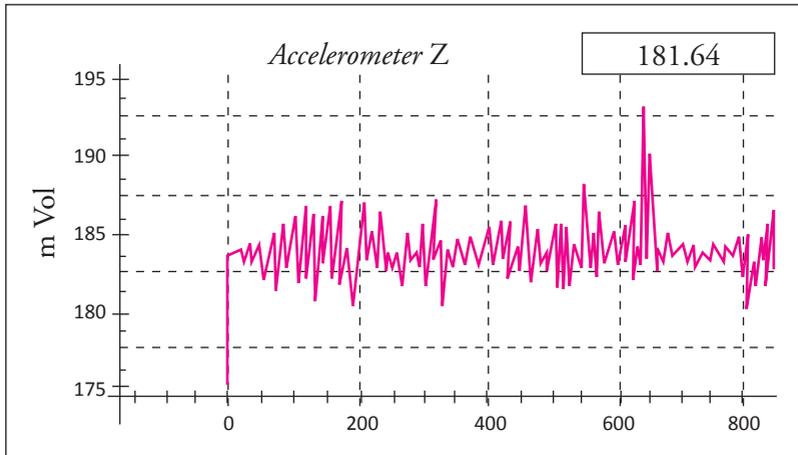
Gambar 19. Diagram Sistem Pengukuran Kemiringan Kereta Saat Berjalan

pengukuran vibrasi, akselerometer dapat digunakan untuk mendeteksi kemiringan kereta. Hal yang diukur adalah frekuensi rendah di bawah 5 Hz pada sumbu Y dengan akselerasi lebih rendah dari 2 g sehingga akselerometer yang digunakan sudah cukup memadai. Pada saat mengukur kemiringan, diukur pula posisi kereta api dengan menggunakan GPS dan data kemiringan didapat sehingga akan diketahui posisi daerah-daerah yang miring.

B. MENDETEKSI SIMPANGAN ARAH X

Pengukuran simpangan arah sumbu X dilakukan untuk mendeteksi besarnya guncangan yang searah dengan laju kereta api. Guncangan akan terjadi apabila terjadi perlambatan laju kereta api secara mendadak ketika pengereman. Guncangan juga terjadi ketika kereta mengalami percepatan, baik percepatan sesaat waktu terperosok, menggilas rel putus, tabrakan kereta, maupun percepatan berjenjang ketika kereta melakukan penambahan kecepatan.

Ada perbedaan antara guncangan yang diakibatkan oleh percepatan sesaat karena kecelakaan dan guncangan karena percepatan berjenjang yang diakibatkan oleh naiknya kecepatan kereta api. Guncangan akibat percepatan sesaat pada kecelakaan ditunjukkan



Gambar 20. Grafik Percepatan Sesaat

dengan naiknya amplitudo secara signifikan dari grafik yang ditampilkan. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 20, grafik direkam saat kereta mengalami percepatan laju kereta dan di akhir rekaman mengalami tumbukan yang disebabkan adanya lubang pada rel.

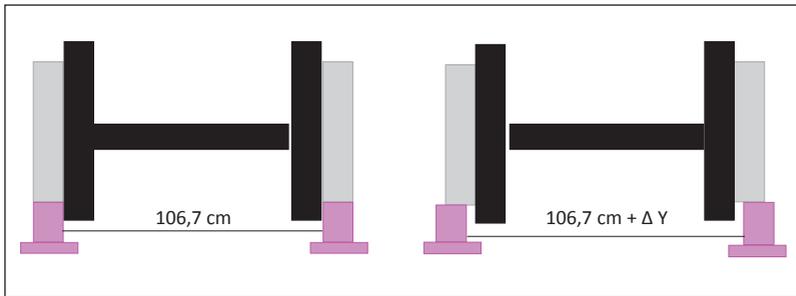
Sementara itu, peningkatan percepatan berjenjang yang diakibatkan naiknya laju kereta api ditunjukkan dengan semakin tingginya frekuensi pembawa. Keadaan ini terlihat dengan semakin kecilnya waktu periode dengan amplitudo yang relatif stabil. Pada akhir rekaman, terjadi lonjakan amplitudo yang disebabkan adanya lubang di antara sambungan rel kereta api yang ditampilkan pada grafik yang terekam pada Gambar 20.

C. MENDETEKSI SIMPANGAN ARAH Y

Kereta anjlok yang diakibatkan oleh ketidaksejajaran rel kereta sering terjadi. Ketidaksejajaran rel kereta api ini antara lain diakibatkan oleh hilangnya paku rel yang berfungsi untuk menjepit rel kereta dengan bantalannya. Hilangnya paku rel menyebabkan rel bergoyang ketika

dilewati kereta api. Hal itu dapat mengakibatkan jarak standar untuk rel sebesar 106,7 cm berubah menjadi $106,7 \text{ cm} + \Delta Y$. Goyangannya rel kereta disebabkan tidak ada pengikat antara rel dengan bantalannya dan mengakibatkan kereta anjlok. Ilustrasi pergerakan dapat dilihat pada Gambar 21.

Pendeteksian ketidaksejajaran dilakukan dengan mengukur vibrasi kereta api pada sumbu Y. Untuk itulah diciptakan sebuah perangkat instrumen yang dapat mendeteksi masalah teknis dan sekaligus mengetahui lokasinya, yakni alat pendeteksi kondisi rel kereta api.



Gambar 21. Ilustrasi Penyimpangan Rel ke arah Y

Perangkat pengukuran meliputi perangkat elektronik yang dapat membaca hasil pengukuran akselerometer dan sekaligus perangkat lunak antarmuka akselerometer sehingga dapat ditampilkan di komputer berupa amplitudo simpangan pada sumbu Y (goyangan kiri-kanan). Data hasil pengukuran dapat dikirimkan secara langsung (*real time*) ke pusat pengolah data dan atau disimpan sebagai data ketidaksejajaran rel kereta api. Untuk mengetahui letak sumber data, perangkat pengukuran dilengkapi dengan GPS yang dapat menampilkan posisi secara langsung (*real time*) di komputer jinjing.

Data *output* akselerometer digunakan untuk keselamatan perjalanan kereta api. Data ini dapat juga digunakan untuk keperluan

preventive maintenance atau peringatan dini terjadinya kecelakaan yang diakibatkan kondisi rel kereta api. Dalam buku ini dilakukan pengukuran ketidaksejajaran yang terjadi pada kereta api sepanjang perjalanan dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara. Hasil pengukuran menunjukkan terjadinya lonjakan yang cukup tinggi ketika kereta api mendekati Stasiun Sudimara. Hasil rekaman disimpan dalam basis data berformat excel. Direkam untuk data vibrasi 5 data per detik dan untuk data GPS dilakukan setiap detik. Rekaman dilakukan sepanjang perjalanan kereta api.

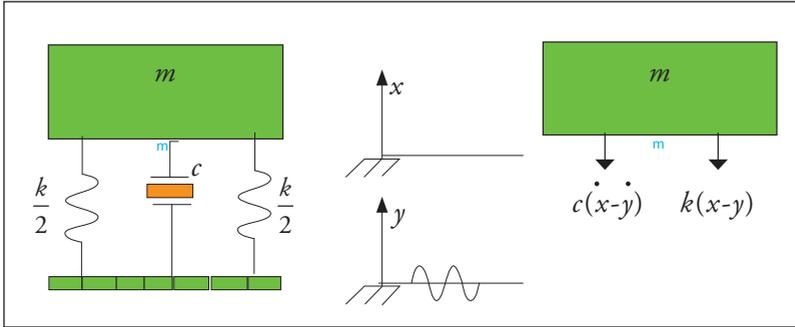
1) Mendeteksi Ketidaksejajaran Rel Kereta Api

Mendeteksi kondisi ketidaksejajaran rel kereta api dilakukan dengan pengukuran pada sumbu Y. Ini berarti pendeteksian dilakukan pada pergerakan penjalaran gelombang periodik yang terjadi karena rel kereta mengalami penyimpangan ke arah sumbu Y saat dilewati kereta. Penjalaran gelombang dari rel ke kereta api merupakan pencerminan dari kondisi rel kereta api yang ditransformasikan pada kereta. Pengukuran vibrasi di atas kereta api mencerminkan pendeteksian kondisi rel kereta api ditambah efek peredaman. Efek peredaman adalah sebuah konstanta yang telah diketahui nilainya sehingga sudah dapat dipastikan bahwa nilai simpangan yang terukur berupa vibrasi pada sumbu Y dapat ditentukan nilainya secara pasti. Gambar 22 menunjukkan ilustrasi sistem eksitasi pada arah Y.

Jika y adalah simpangan harmonik titik penopang, penggambaran gerak dasarnya adalah:

$$y = Y \sin \omega t$$

dengan Y adalah simpangan yang dihasilkan pada saat melakukan pengukuran. Apabila sistem suspensi dibuat *rigid* pada arah Y maka $y = Y$.



Gambar 22. Ilustrasi Sistem Dieksitasi oleh Gerak Titik Penopang pada Arah Y

Pengukuran arah sumbu Y dilakukan untuk mengetahui simpangan yang terjadi pada rel kereta api yang diakibatkan ketidaksejajaran rel.

Vibrasi pada sumbu Y diukur dengan menempatkan akselerometer tegak lurus terhadap lantai kereta api. Arah panah pada sumbu Y tegak lurus terhadap arah sumbu X karena vibrasi yang diukur akan berimpitan dengan arah sumbu Y dan sejajar ke samping dengan lantai kereta api.

Output dari akselerometer merupakan data analog. Agar bisa dibaca komputer, data analog diumpankan pada perangkat ADC untuk diubah menjadi data digital. Selanjutnya, data bisa diproses menggunakan komputer. Pemrosesan data *output* akselerometer menggunakan perangkat lunak Builder C++ dengan format pengukuran hubungan *client* dan *server*. *Client* bertanggung jawab terhadap mode pengukuran dan *server* melakukan aktivitas pengontrolan, penyimpanan data, dan penampilan data. Metode ini digunakan untuk semua pemrosesan data dari unit sensor akselerometer dan GPS.

Data hasil pengukuran diproses menjadi data yang siap ditampilkan dengan menarik, mudah dibaca, dan mudah dimengerti. Data pengamatan disimpan dalam format excel sehingga mudah di-

proses lebih lanjut dalam bentuk grafik atau laporan data pengukuran harian. Seluruh hasil pengamatan disimpan dalam format tertentu, ditampilkan, dan diproses untuk digunakan sebagai data informasi. Kemudian, data disimpan dalam bentuk basis data dengan parameter pengukuran meliputi waktu pengukuran, tanggal, dan parameter lain yang dibutuhkan.

Sebelum melakukan pengukuran vibrasi di lapangan, akselerometer terlebih dahulu dikarakterisasi di laboratorium. Tujuannya untuk mendeteksi tingkat ketelitian dari sensor tersebut. Pengukuran pada kereta api dilakukan dengan menempatkan akselerometer pada gerbong kereta api persis di belakang masinis dan diletakkan sejajar di antara kedua buah rel kereta api.

Hasil pengukuran vibrasi sumbu Y dan posisi kereta api pada perjalanan kereta api dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara dapat dilihat pada Tabel 4.

Data posisi GPS dapat terinformasikan untuk waktu pendeteksian dengan selang waktu satu detik. Jika kecepatan kereta 60 km/jam, dapat dihitung bahwa GPS dapat mengirimkan data untuk setiap jarak 16,6 meter sekali.

Dari hasil pengukuran, terekam bahwa pengukuran posisi dilakukan untuk interval 1 detik, dan data vibrasi dilakukan 5 pengukuran untuk setiap detiknya. Frekuensi yang timbul akibat rel kereta api adalah 2 Hz maka setiap terjadi lonjakan yang diakibatkan oleh rel kereta api akan dapat dicacah sebanyak $5/2 = 2,5$ kali.

Hasil pengukuran vibrasi sumbu Y yang berupa data mentah dan masih dalam satuan mV dikonversi menjadi data simpangan d (mm). Selanjutnya baru dilakukan analisis. Hasil konversi dapat dilihat pada Tabel 5.

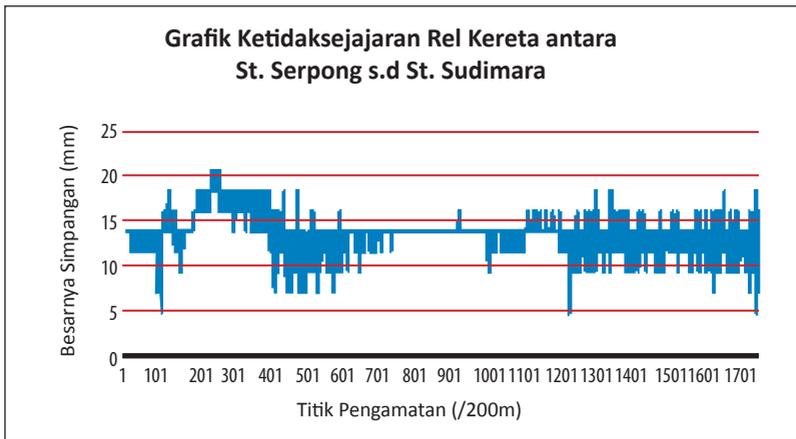
Tabel 4. Contoh Hasil Ukur Vibrasi Sumbu Y dan Posisi Kereta antara Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara

BL/TG/THI	Waktu	No. Sampel	Acc. Y	Latitude	Longitude	Lokasi
11/08/2010	09:59:34	198	1,58	619.21432	10640.08583	
11/08/2010	09:59:34	198	1,58			
11/08/2010	09:59:35	199	1,58			
11/08/2010	09:59:35	200	1,58			
11/08/2010	09:59:35	201	1,58			
11/08/2010	09:59:35	202	1,58			
11/08/2010	09:59:35	203	1,58	619.21432	10640.08583	
11/08/2010	09:59:35	203	1,58			
11/08/2010	09:59:36	204	1,58			
11/08/2010	09:59:36	205	1,58			
11/08/2010	09:59:36	206	1,59			
11/08/2010	09:59:36	207	1,58			
11/08/2010	09:59:36	207	1,58	619.21432	10640.08583	
11/08/2010	09:59:36	208	1,58			
11/08/2010	09:59:37	209	1,58			
11/08/2010	09:59:37	210	1,58			
11/08/2010	09:59:37	211	1,58			
11/08/2010	09:59:37	212	1,58			
11/08/2010	09:59:37	212	1,58	619.21432	10640.08583	
11/08/2010	09:59:37	213	1,57			
11/08/2010	09:59:38	214	1,59			
11/08/2010	09:59:38	215	1,57			
11/08/2010	09:59:38	216	1,58			
11/08/2010	09:59:38	217	1,58			
11/08/2010	09:59:38	217	1,58	619.21432	10640.08583	
11/08/2010	09:59:38	218	1,57			
11/08/2010	09:59:39	219	1,58			

Tabel 5. Contoh Hasil Konversi Data Baku Vibrasi Sumbu Y menjadi Data Simpangan Sumbu Y

Acc Sb. Y (mV)	G Sb. Y (mG)	a	v	d
		Sb. Y (mm/s ²)	Sb. Y (mm/s)	Sb. Y (mm)
80	296.2963	f (2 Hz)	f (2 Hz)	f (2 Hz)
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
90	333.3333	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	3268.667	260.2442	20.72008
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
70	259.2593	2905.481	231.3281	18.41785
90	333.3333	2542.296	202.4121	16.11562
70	259.2593	3268.667	260.2442	20.72008
80	296.2963	2542.296	202.4121	16.11562
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
70	259.2593	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2542.296	202.4121	16.11562
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785
80	296.2963	2905.481	231.3281	18.41785

Untuk dapat melakukan analisis dengan baik, dilakukan pembuatan grafik yang datanya diambil dari besarnya simpangan (d) yang terjadi dalam satuan milimeter (mm) pada Tabel 5. Pembuatan grafik hasil pengukuran vibrasi sumbu Y, untuk setiap titik pengamat yang berjarak 200 m dapat dilihat pada Gambar 23. Grafik ini merupakan hasil rekaman pengukuran vibrasi sumbu Y oleh akselerometer sepanjang Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara.



Gambar 23. Pengukuran Vibrasi Kereta Api Sumbu Y yang Diukur dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara.

Fluktuasi simpangan terbesar yang terjadi selama perjalanan kereta api berkisar 3 cm dan terjadi ketika kereta mendekati Stasiun Sudimara. Dari grafik terlihat bahwa besarnya simpangan dimulai pada titik tengah di sekitar Stasiun Rawabuntu sebesar 3 cm dan ketika kereta api mendekati Stasiun Sudimara dengan besar defleksi 2 sampai 3 cm.

2) Mendeteksi Simpangan Arah Z

Vibrasi kereta api pada sumbu Z diakibatkan oleh lonjakan ke atas dan ke bawah dari kondisi rel kereta api. Kondisi tidak normal rel kereta

api dapat ditimbulkan oleh beberapa hal, misalnya struktur tanah yang labil, kondisi balas kurang baik, bantalan rel rusak, paku rel hilang, sambungan antarrel terlalu renggang atau kerusakan dari rel itu sendiri. Perangkat instrumen pemeriksa kondisi rel dapat mendeteksi sebagian masalah teknis yang ditimbulkan dari rel kereta api, sekaligus mengetahui lokasi adanya ketidaknormalan rel kereta api.

Instrumen pendeteksi kondisi rel merupakan perangkat elektronik yang terdiri dari sensor akselerometer, ADC, dan komputer yang difungsikan untuk mengukur adanya vibrasi pada arah sumbu Z. Instrumen pendeteksi kondisi rel dilengkapi dengan perangkat lunak pemrosesan data pengukuran menggunakan Builder C++ yang dapat menampilkan hasil pengukuran vibrasi berupa amplitudo lonjakan pada sumbu Z (guncangan atas-bawah) di komputer. Data hasil pengukuran dapat dikirim secara langsung (*real time*) ke pusat pengolahan data dan atau disimpan sebagai data perjalanan kereta api. Instrumentasi pendeteksi kondisi rel juga dilengkapi GPS yang berfungsi untuk mengetahui letak terjadinya lonjakan. Pengukuran lonjakan dan pengukuran posisi dilakukan secara bersamaan secara langsung (*real time*).

Penggunaan instrumentasi pendeteksi kondisi rel kereta api dengan benar akan menjamin kondisi rel kereta api dalam keadaan baik. Pada akhirnya, alat ini dapat menjamin keselamatan perjalanan kereta api. Data yang dihasilkan dapat digunakan untuk keperluan *preventive maintenance* atau peringatan dini adanya rel kereta api yang kurang baik. Pengukuran vibrasi sumbu Z dilakukan sepanjang perjalanan dari Stasiun Serpong sampai Sudimara. Hasil pengukuran menunjukkan terjadi lonjakan yang cukup tinggi ketika kereta api mendekati Stasiun Sudimara. Hasil pengukuran direkam dan disimpan di basis data berformat excel, dengan kecepatan perekaman 5 data per sekon dan untuk data GPS dilakukan setiap detik. Rekaman

dilakukan sepanjang perjalanan kereta api seperti yang terlihat pada Tabel 4.

Pengukuran vibrasi di atas kereta api mencerminkan pendeteksian kondisi rel kereta api yang harus disertai efek peredaman. Efek peredaman adalah sebuah konstanta yang telah diketahui nilainya maka sudah dapat dipastikan bahwa nilai lonjakan yang terukur berupa vibrasi pada sumbu Z dapat ditentukan nilainya secara pasti. Penempatan akselerometer untuk mengukur vibrasi sumbu Z dapat dilihat pada Gambar 24.



Gambar 24. Ilustrasi Penempatan Akselerometer pada Sumbu Z

Gambar tersebut diambil saat pengukuran vibrasi di atas kereta api menggunakan akselerometer yang ditempatkan di tengah-tengah belakang masinis. Pengukuran arah sumbu Z dilakukan untuk dapat mengetahui seberapa besar lonjakan yang terjadi ketika rel dilewati kereta api. Selain lonjakan rel kereta api, ada beberapa parameter yang dapat terekam, seperti ketidakstabilan roda kereta api (*unbalance*), frekuensi fundamental kereta api, roda kereta sudah tidak bulat (mengalami keausan akibat pengereman), resonansi badan kereta,

ketidakstabilan mesin kereta, ketidakstabilan frekuensi listrik dari inverter, dan lain-lain.

Pengukuran vibrasi pada sumbu Z di atas kereta dilakukan dengan akselerometer ditempatkan tegak lurus terhadap arah jalannya kereta api. Hal itu karena vibrasi yang diukur tegak lurus terhadap arah jalannya kereta api.

Output dari akselerometer merupakan data analog. Untuk dapat dibaca dengan baik oleh komputer, data analog diumpungkan pada perangkat ADC terlebih dahulu. Dengan menggunakan perangkat lunak, nilai hasil ukur tegangan dari sensor akselerometer dikonversi menjadi data percepatan dalam satuan ($m/sekon^2$). Menggunakan perangkat excel, data percepatan diubah menjadi satuan simpangan dalam satuan (mm).

Untuk melengkapi data pengukuran vibrasi yang dihasilkan oleh akselerometer, dilakukan pula pengukuran posisi menggunakan GPS. Tujuannya untuk mengetahui posisi titik pada saat pengukuran vibrasi dilakukan. Ilustrasi sistem pengukur vibrasi sumbu Z di dalam kereta api menggunakan komputer dapat dilihat pada Gambar 25.



Gambar 25. Instrumen Pengukur Vibrasi Perjalanan Kereta Api

Pengukuran dalam rangkaian kereta api dilakukan menggunakan komputer jinjing yang dilengkapi baterai dengan kemampuan operasi sekitar 6 jam. Untuk mengaktifkan perangkat ADC dan akselerometer disuplai dari komputer jinjing melalui *port* USB. Komputer jinjing dilengkapi perangkat lunak seperti yang terdapat pada perangkat komputer instrumen pendeteksi kondisi rel kereta api. Setelah data diproses *in-situ*, data rekaman dapat dikirim ke pusat pengendalian perjalanan kereta api untuk digunakan sebagai data *monitoring*. Basis data hasil pengukuran yang disimpan dilengkapi dengan hari, tanggal, jam, menit, detik, dan alarm.

Pengukuran di atas kereta api dilakukan dengan menempatkan akselerometer pada gerbong kereta api persis di belakang masinis dan diletakkan sebisa mungkin tepat di tengah-tengah kedua rel kereta api. Getaran yang timbul akibat gerakan kereta api saat berjalan di atas rel, diukur akselerometer dengan fokus mengukur getaran pada sumbu Z. Getaran diukur bersamaan waktunya dengan pengukuran posisi GPS yang juga ditempatkan di atas kereta api. GPS yang digunakan untuk mengukur posisi kereta api harus terlebih dahulu dibandingkan nilai ukurnya dengan GPS lain yang bertindak sebagai GPS *Base*. Nilai yang ditunjukkan GPS pengukur dengan GPS *Base* harus sama (pengukuran seperti ini dikenal dengan nama pengukuran diferensial).

Hasil pengukuran vibrasi kereta api sumbu Z dan posisi kereta api untuk perjalanan kereta api dari Stasiun Serpong sampai Sudimara dapat dilihat pada Tabel 6.

Data hasil pengukuran vibrasi sumbu Z yang berupa data mentah dan masih dalam satuan mV dikonversi menjadi data simpangan d (mm), untuk selanjutnya baru dilakukan analisis. Hasil konversi pada Tabel 6 menjelaskan konversi data baku vibrasi sumbu Z dari akselerasi miliVolt (mV), milli Graftasi (mG), percepatan (mm/s^2), kecepatan (mm/s) sampai dengan data simpangan (mm) sumbu Z.

Tabel 6. Contoh Sebagian dari Hasil Ukur Vibrasi Sumbu Z dan Posisi Kereta antara Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara

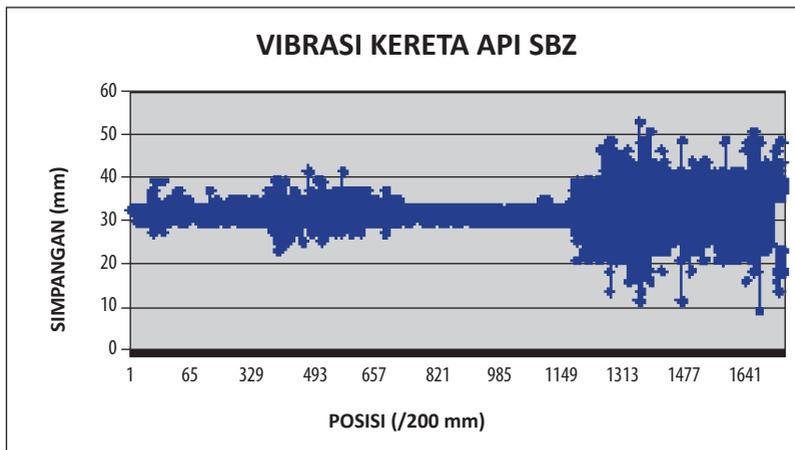
BL/TG/TH	Jam	Sample	Acc Z	Latitude	Longitude	Stasiun
11/08/2010	09:58:53	1	0	619.2115	10.640	Serpong
11/08/2010	09:58:55	3	1,84			
11/08/2010	09:58:55	3	1,84			
11/08/2010	09:58:55	4	1,84			
11/08/2010	09:58:55	5	1,84			
11/08/2010	09:58:55	5	1,84	619.2115	10.640	
11/08/2010	09:58:55	6	1,84			
11/08/2010	09:58:56	7	1,84			
11/08/2010	09:58:56	8	1,84			
11/08/2010	09:58:56	9	1,84			
11/08/2010	09:58:56	10	1,84	619.2115	10.640	
11/08/2010	09:58:56	10	1,84			
11/08/2010	09:58:56	11	1,84			
11/08/2010	09:58:57	12	1,84			
11/08/2010	09:58:57	13	1,83			
11/08/2010	09:58:57	14	1,84			
11/08/2010	09:58:57	15	1,84	619.2115	10.640	
11/08/2010	09:58:57	15	1,84			
11/08/2010	09:58:57	16	1,84			
11/08/2010	09:58:58	17	1,84			
11/08/2010	09:58:58	18	1,84			
11/08/2010	09:58:58	19	1,83			

Analisis akan lebih baik bila dilengkapi dengan pembuatan grafik yang datanya diambil dari besarnya simpangan (d) yang terjadi dalam satuan milimeter (mm) dari Tabel 7. Pembuatan grafik hasil pengukuran vibrasi sumbu Z dapat dilihat pada Gambar 26.

Fluktuasi lonjakan terbesar yang terjadi selama perjalanan kereta api berkisar 4 cm dan terjadi ketika kereta mendekati Stasiun Sudimara. Pada saat kereta melaju, titik nol berada pada level 3 cm, baru kemudian terjadi lonjakan naik-turun secara fluktuatif dengan simpangan 2 cm seperti yang terlihat pada Gambar 26.

Tabel 7. Contoh Hasil Konversi Data Baku Vibrasi Sumbu Z sampai dengan Data Simpangan Sumbu Z

Acc	Gravitasi	a	v	d
Sb.Z (mV)	Sb. Z (mG)	Sb. Z (mm/s ²)	Sb. Z (mm/s)	Sb. Z (mm)
			(f =2 Hz)	(f =2 Hz)
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123
130	481.4815	4721.407	375.9082	29.929
140	518.5185	5084.593	404.4283	32.23123



Gambar 26. Grafik Hasil Pengukuran Vibrasi Kereta Api Sumbu Z yang Diukur Akselerometer dari Stasiun Serpong sampai Stasiun Sudimara

Grafik menunjukkan bahwa besarnya lonjakan dimulai pada titik tengah 3 cm dan berfluktuasi pada nilai 1 cm sampai 5 cm pada garis grafik. Kondisi ini menggambarkan bahwa pada saat rel dilewati kereta api dalam posisi mengambang, lonjakan akan terjadi. Lonjakan terbesar terjadi ketika kereta api mendekati Stasiun Sudimara dengan besar defleksi 2 cm.

BAB 5

MENDETEKSI REL MENGUNAKAN KAMERA

Kondisi rel kereta api secara visual dapat dideteksi dengan menggunakan kamera vision. Kondisi visual rel kereta api meliputi:

1. Kondisi rel jarak jauh, seperti yang dijelaskan pada subbab 5.1. Tujuannya untuk mengamati kondisi rel terhadap gangguan dan lingkungan di sekitar rel.
2. Kesejajaran rel secara visual seperti pada subbab 5.2. Tujuannya untuk mendeteksi kesejajaran rel agar kereta tidak anjlok dan mengamati kesejajaran rel dipertahankan sebesar 106,7 cm sesuai dengan ketentuan yang dipersyaratkan secara visual dengan bantuan perangkat lunak komputer vision.
3. Kondisi putus rel seperti pada subbab 5.3. Tujuannya untuk melihat secara visual terjadinya rel yang putus pada lokasi tertentu dan dapat diketahui lokasinya.

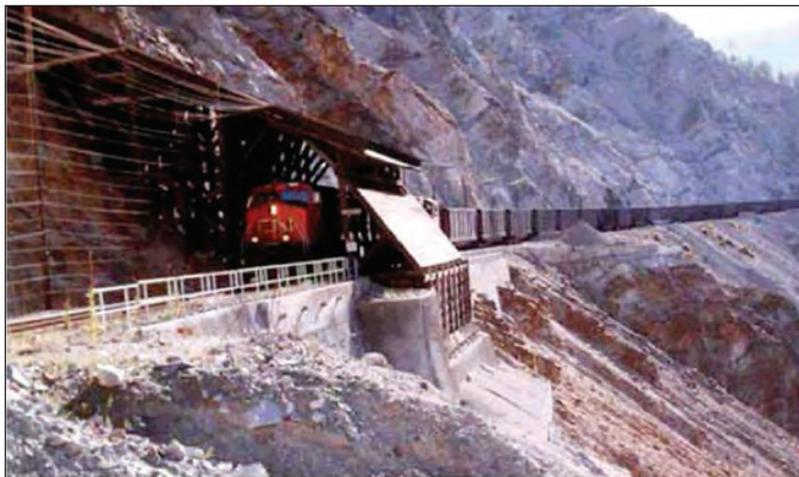
A. MENDETEKSI KONDISI REL JARAK JAUH

Deteksi kondisi rel jarak jauh dilakukan untuk mengantisipasi keterbatasan masinis mengenali situasi rel dan lingkungannya. Mengetahui kondisi rel jarak jauh penting untuk mengantisipasi keadaan darurat,

yakni rel mengalami gangguan sehingga pengereman masih dapat dilakukan. Demikian pula pemantauan kondisi lingkungan dengan pandangan yang cukup luas di sekitar rel. Hal itu dapat dilakukan dengan menggunakan kamera vision jarak jauh agar aspek lingkungan yang menyebabkan tanda-tanda kelongsoran—seperti selokan, tebing dekat rel dengan jangkauan memadai dan aspek lain yang belum dapat disebutkan di sini—dapat diamati dengan baik.

Dalam proses pengamatan, diperlukan alat perekam yang memenuhi persyaratan kemampuan visualnya. Program *Railway Ground Hazard Research* mengembangkan teknik model evaluasi sebuah bangunan (*techniques of building digital evaluation model*) menggunakan komputer untuk menganalisis gambar topografi dengan teknik topogrametri menggunakan kamera digital. Contoh kondisi lingkungan ekstrem yang perlu diamati dapat dilihat pada Gambar 27.

Kemampuan visual sebuah kamera bergantung pada resolusi, jumlah pixel, dan penempatan kamera pada objek yang tepat sehingga dapat merekam objek yang harus dimonitor. Dalam percobaan, ka-



Gambar 27. Lingkungan Ekstrem Rel Kereta Api Berupa Pegunungan Kapur yang Mudah Longsor (Barragam dkk 2011)

mera CCTV dengan resolusi 4 Mpixel ditempatkan di depan kereta inspeksi dengan ketinggian sekitar 2 meter dari permukaan rel, seperti yang terlihat pada Gambar 28.

Kamera vision untuk pengamatan kondisi rel jarak jauh dan pengamatan pada lingkungan sekitar, dipasang di atas mesin lori kereta api dan menghasilkan data berupa gambar rel kereta api beserta lingkungan sekitarnya ke arah depan seperti pada Gambar 29.

Dalam mengamati rel jarak jauh dan lingkungan sekitarnya, kualitas gambar harus bagus. Kualitas gambar ini sangat menentukan untuk melakukan pengamatan kondisi dari selokan, tebing curam dekat rel, lampu sinyal, dan peralatan pendukung lainnya yang perlu terlihat dengan jelas sehingga komputer dapat membedakan keadaan lingkungan secara akurat.



Gambar 28. Penempatan Kamera pada Pengukuran Jarak Jauh pada Lori di Stasiun Bandung



Gambar 29. Gambar Lingkungan di Depan Lori

B. MENDETEKSI KESEJAJARAN REL

Kesejajaran rel kereta api dideteksi dengan menempatkan kamera vision di lori kereta api. Kamera vision diletakkan tepat di atas lajur rel kereta api dengan jarak kamera 45 cm di atasnya. Untuk dapat mengamati dua rel sekaligus, dibutuhkan 2 buah kamera. Setiap kamera mendeteksi kondisi satu lajur rel, sedangkan pada tampilannya kedua, rel ditempatkan sejajar satu terhadap yang lain pada layar monitor sehingga menghasilkan pengamatan data berupa gambar kedua rel seperti yang dapat dilihat pada Gambar 30.

Mendeteksi kesejajaran rel kereta api dari hasil kamera perlu bantuan perangkat lunak. Fungsinya untuk menetapkan harga dari jarak kedua lajur rel. Perangkat lunak yang dibutuhkan adalah *computer vision*. Pada *computer vision*, ada banyak cara mendeteksi jarak antara dua rel kereta api. Salah satunya adalah memberi tanda silang pada tampilan gambar sebagai standar jarak dari dua rel kereta api yang



Gambar 30. Gambar Kondisi Rel yang Diamati di Stasiun Bandung

sejajar dengan nilai 106,7 cm. Penempatan tanda silang dilakukan saat lori masih berhenti dan dilakukan secara manual menggunakan mistar panjang. Metode ini dipilih karena masih menggunakan perangkat keras dan mudah dipahami sampai level operator. Pembacaan kesalahan pun akan mudah diketahui. Pengaturan nilai jarak lajur kiri maupun kanan pada monitor penampil ditentukan dari jumlah pixel rekaman—dihitung dari tepi rekaman dan dihitung sebagai nilai angka nol. Kemudian ditarik ke kiri dan ke kanan sama besar. Apabila garis tepi rel tidak berimpit dengan tanda silang maka akan terjadi penyimpangan jarak rel. Besarnya penyimpangan yang terjadi dapat dihitung dengan mengurangi perbedaan antara tanda silang dengan garis tepi rel dikalikan dengan panjang pixel.

C. MENDETEKSI KONDISI PUTUS REL

Kondisi putus rel kereta dapat dideteksi dengan memperhatikan pergerakan penjalaran gelombang periodik kondisi rel kereta api yang ditransformasikan pada kereta. Kondisi putus rel terdeteksi dari terganggunya gelombang periodik dengan gelombang kejut anomali pada rel kereta. Kejadian putus rel akan berdampak langsung pada kereta api. Misalnya dapat menimbulkan kecelakaan berupa anjloknya kereta api, dapat pula menyebabkan rusaknya roda kereta akibat hantaman roda kereta langsung terhadap celah yang ditimbulkan rel yang putus. Akibat yang paling sederhana adalah mengganggu kenyamanan berkereta. Contoh ekstrem terjadinya putus rel dapat dilihat dari Gambar 31.



Gambar 31. Rel Kereta yang Putus

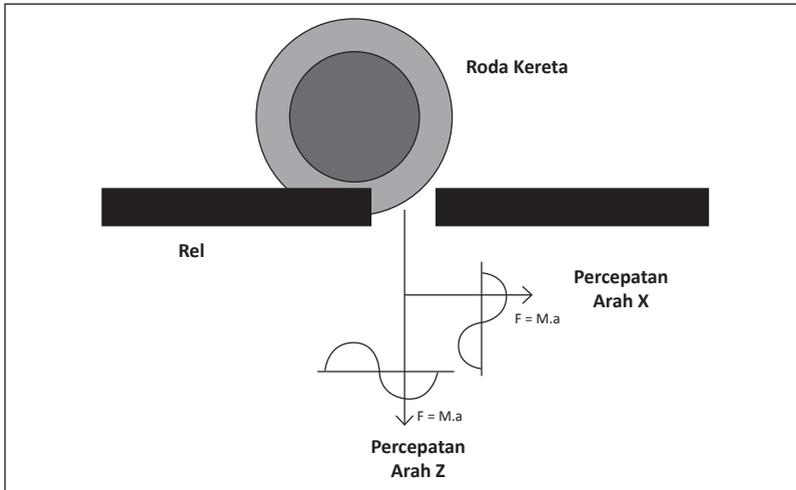
Peristiwa putusnya rel kereta api dapat dideteksi dengan melakukan pengukuran menggunakan sensor akselerometer. Kondisi putus rel terdeteksi dengan adanya percepatan sesaat ke arah sumbu X dan sumbu Z. Percepatan sesaat arah sumbu X terjadi karena bertambahnya kecepatan saat roda terperosok. Selain percepatan, timbul pula perlambatan sesaat ketika roda menumbuk rel yang putus. Percepatan arah Z terjadi akibat adanya tumbukan tegak lurus ketika roda kereta masuk dalam celah patahan. Perubahan percepatan yang

terjadi pada sumbu X dan sumbu Z akibat putus rel direkam oleh akselerometer berupa data vibrasi analog. Untuk dapat diproses menggunakan komputer, data vibrasi analog perlu dilewatkan ke rangkaian ADC. Hasil pemrosesan komputer yang dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Builder C++ adalah data rekaman pengukuran kondisi rel kereta api. Data rekaman ditampilkan pada layar monitor berupa grafik dan dalam bentuk tampilan excel. Data rekaman kondisi rel kereta api dapat disimpan dalam bentuk basis data. Data hasil pendeteksian kondisi rel kereta dapat dikirim secara langsung ke pusat pengontrol data.

Pemeriksaan kondisi rel selain menggunakan sensor akselerometer secara bersamaan, dapat dilakukan juga pendeteksian menggunakan kamera vision sehingga hasil pemeriksaan rel kereta api saat itu dapat terekam. Putus rel kereta yang terekam oleh akselerometer juga dapat terlihat oleh kamera vision. Data hasil pemeriksaan direkam dalam format video dot avi (.avi) yang merupakan tampilan di layar dari seluruh pengamatan pada saat pengukuran dilakukan.

Untuk mengetahui posisi kerusakan rel, perangkat pengukuran dilengkapi GPS yang menunjukkan posisi kerusakan berdasarkan lokasi *latitude* dan *longitude* tempat kerusakan rel terjadi.

Pengukuran vibrasi menggunakan lori kereta api dapat pula dilakukan di atas kereta api reguler. Pengukuran yang demikian dapat mewakili kondisi rel kereta api sesungguhnya. Hasil yang terekam pada saat melakukan pengukuran tentu saja harus memperhitungkan efek peredaman, tetapi karena efek peredaman bernilai konstan maka karakteristik kerusakan dapat diinterpretasikan dengan baik. Ilustrasi terjadinya lonjakan yang diakibatkan putus rel kereta api dapat dilihat pada Gambar 32.



Gambar 32. Gaya yang Terjadi pada Saat Kondisi Putus Rel Kereta

Pergeseran roda lori akan mengalami percepatan di dua sumbu, yang dapat dijelaskan berdasarkan teori gerak periodik sederhana. Besarnya gaya yang bekerja pada kondisi cacat putus rel bergantung dari lebar putus yang terjadi, dengan besar gaya pada sumbu X yaitu:

$$F_x = M \cdot a_x$$

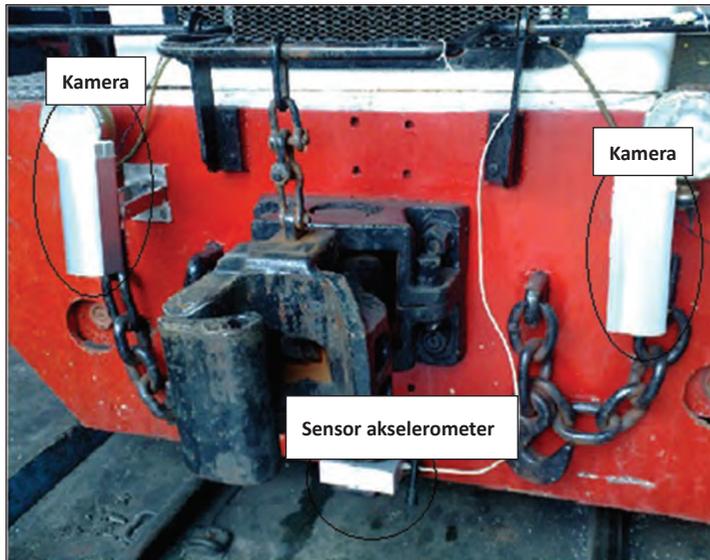
Dan besarnya gaya pada sumbu Z:

$$F_z = M \cdot a_z$$

dengan massa konstan sehingga yang berpengaruh adalah besarnya percepatan yang terjadi pada saat lori menumbuk daerah kondisi cacat rel kereta.

Dalam pendeteksian kondisi rel kereta, diperlukan beberapa percobaan untuk dapat menentukan penempatan posisi dan jarak dari kamera ke permukaan rel kereta api. Dengan beberapa kali interaksi, posisi terbaik untuk kamera vision mendeteksi kondisi rel adalah dengan jarak 45 cm tegak lurus di atas rel kereta api. Penetapan kamera pada jarak 45 cm belumlah final, dapat berubah sesuai kebutuhan hasil analisis rekaman setelah pengukuran.

Pendeteksian kondisi rel dilakukan dengan menempatkan dua kamera, tiap-tiap kamera diletakkan tepat tegak lurus di atas rel untuk mendeteksi rel bagian kiri dan kanan. Akselerometer yang digunakan berjumlah 1 buah, ditempatkan pada posisi di tengah-tengah antara dua rel dan terletak 30 cm di atas rel kereta. Penempatan kamera vision dan sensor akselerometer pada lori dapat dilihat pada Gambar 33.



Gambar 33. Letak Posisi Kamera Vision dan Sensor Akselerometer pada Lori

Penetapan posisi kerusakan putus rel diketahui dengan terjadinya amplitudo ekstrem pada data rekaman akselerometer, terlihat secara visual kerusakan rel yang terjadi pada data rekaman kamera, dan terdeteksinya posisi kerusakan oleh GPS. Pengambilan data berupa gambar, simpangan, lendutan, dan posisi dilakukan secara bersamaan dengan menampilkan gambar, simpangan, lendutan, dan posisi pada satu layar. Semua parameter kondisi rel yang diukur disimpan dalam basis data pengukuran.

Pemeriksaan kondisi putus rel dilakukan saat lori berjalan. Dalam percobaan ini, kecepatan lori saat pendeteksian bervariasi. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan hasil pendeteksian yang optimum.

Data baku perangkat ukur GPS dan akselerometer dibuat bersamaan waktunya dan ditampilkan dalam bentuk hyperterminal. Tujuannya agar pengecekan data lapangan dari sensor ukur dapat diketahui keberhasilannya. Dengan demikian, keberhasilan pendeteksian dapat dimonitor. Data baku disusun sedemikian rupa menjadi format data yang susunannya bergantung pada kebutuhan pengamatan. Tujuannya supaya mudah dimengerti dan diproses lebih lanjut menjadi laporan yang mudah dianalisis. Contoh data baku dalam bentuk hyperterminal yang didapat dari alat ukur ada pada Gambar 34.

Proses penyusunan data baku menjadi data dalam bentuk tabel dilakukan dengan menggunakan hubungan komunikasi *client-server*.

```

telnet - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
[Icons]

$GPRMC,032911.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.32,25.5,190413,0.0,E,6E
$GPVTG,25.5,1.25,S,M,0.32,N,0.59,K=43
$GPRSA,A,3,29,21,31,25,18,2,12,30,0.0,39,8,17.0,36.0,07
$GPGSV,3,1,10,29,22,000,45,21,67,000,39,31,47,000,36,25,49,000,29=7D
$GPGSV,3,2,10,18,46,000,23,22,27,000,23,12,21,000,17,30,55,000,39=78
$GPGSV,3,3,10,06,03,000,00,14,15,000,00=7C
$GPGGA,032912.0,0621.36249,S,10639.70041,E,1.4,17.0,76.5,M,-1.9,M,-77
$GPGLL,0621.36249,S,10639.70041,E,032912.0,3C
$GPRMC,032912.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.12,3.9,190413,0.0,E,S,7
$GPVTG,3.9,T,3.9,M,0.12,N,0.21,K=4E
$GPGGA,032913.0,0621.36249,S,10639.70041,E,1.10,17.0,76.5,M,-1.9,M,-43
$GPRLL,0621.36249,S,10639.70041,E,032913.0,3D
$GPRMC,032913.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.24,2.7,190413,0.0,F,5A
$GPVTG,2.1,T,2.1,M,0.24,N,0.44,K=48
$GPGGA,032914.0,0621.36249,S,10639.70041,E,1.10,17.0,76.5,M,-1.9,M,-44
$GPRLL,0621.36249,S,10639.70041,E,032914.0,3E
$GPRMC,032914.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.32,6.8,190413,0.0,F,57
$GPVTG,6.8,T,6.8,M,0.32,N,0.59,K=43
$GPGGA,032915.0,0621.36249,S,10639.70041,E,1.10,17.0,76.5,M,-1.9,M,-45
$GPRLL,0621.36249,S,10639.70041,E,032915.0,3B
$GPRMC,032915.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.20,343.2,190413,0.0,F,5D
$GPVTG,343.2,T,343.2,M,0.20,N,0.36,K=47
$GPGGA,032916.0,0621.36249,S,10639.70041,E,1.10,17.0,76.5,M,-1.9,M,-46
$GPRLL,0621.36249,S,10639.70041,E,032916.0,38
$GPRMC,032916.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.14,347.7,190413,0.0,F,58
$GPVTG,347.7,T,347.7,M,0.14,N,0.27,K=4E
$GPGSO,0.3,29,21,31,25,18,22,30,0.0,39,9,17.0,36.1,04
$GPGSV,3,1,10,29,22,000,44,21,67,000,39,31,47,000,34,25,49,000,29=7C
$GPGSV,3,2,10,18,46,000,23,22,27,000,24,30,55,000,39,06,00,000,00=7F
$GPGSV,3,3,10,12,21,000,00,14,15,000,00=79
$GPGGA,032917.0,0621.36249,S,10639.70041,E,1.4,17.0,76.5,M,-1.9,M,-72
$GPRLL,0621.36249,S,10639.70041,E,032917.0,39
$GPRMC,032917.0,A,0621.36249,S,10639.70041,E,0.22,354.9,190413,0.0,E,S,70
$GPVTG,354.9,T,354.9,M,0.22,N,0.41,K=4B

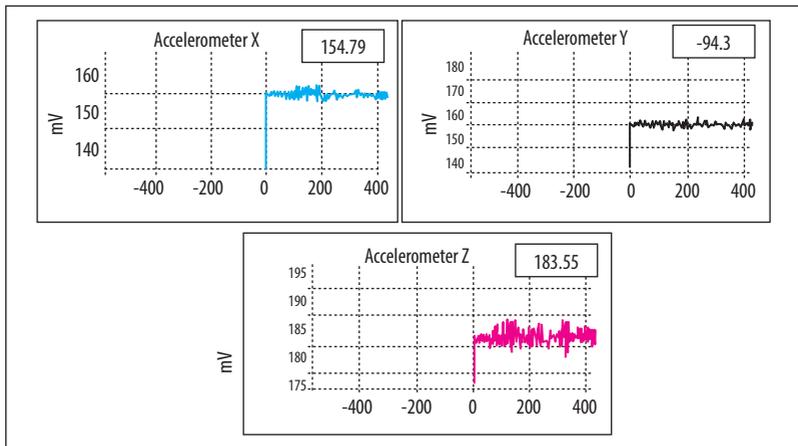
```

Gambar 34. Data Baku GPS dan Sensor Akselerometer dalam Bentuk Hyperterminal

Proses pendeteksian posisi (*way point*) dari GPS tidak mengganggu kecepatan data masuk dari akselerometer sehingga pengamatan server dapat menerima data setiap 1 detik dari GPS dan dapat menerima 5 data baku dari akselerometer.

Sistem komunikasi *client-server* dapat memproses data dalam waktu kurang dari 1 detik. Dengan demikian, semua data pengamatan dapat ditampilkan setiap detik.

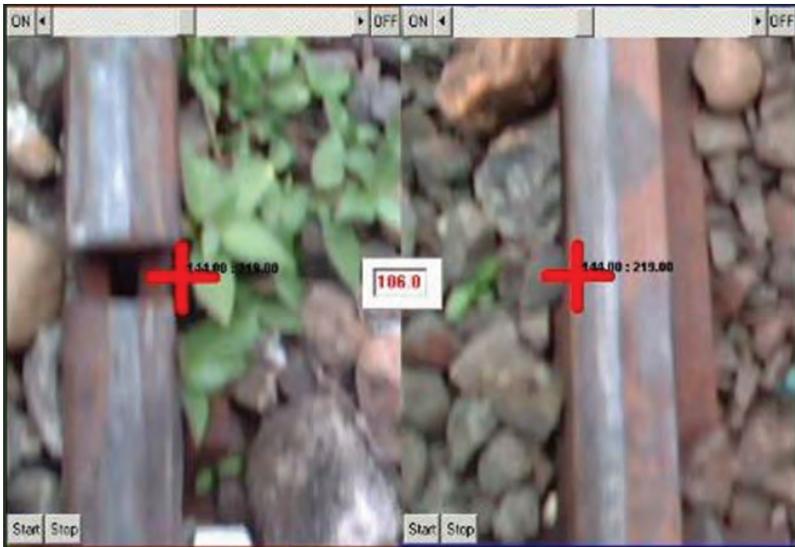
Hasil pendeteksian kondisi rel kereta api ditampilkan pada layar monitor yang disusun sedemikian rupa sehingga dapat memudahkan pengamatan kondisi putus rel. Hasil pengukuran vibrasi menggunakan sensor akselerometer dibuat dalam format excel, dan ditampilkan (pada layar monitor) berbentuk grafis. Hal itu akan memudahkan operator mendeteksi kerusakan yang terjadi dengan melihat besarnya amplitude tinggi yang ditampilkan pada layar monitor. Hasil pengukuran vibrasi pada sumbu X dan sumbu Z menunjukkan amplitude yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang ditunjukkan pada sumbu Y yang relatif datar seperti pada Gambar 35.



Gambar 35. Tampilan Hasil Pengukuran Vibrasi Pendeteksian Kondisi Putus Rel Kereta Api

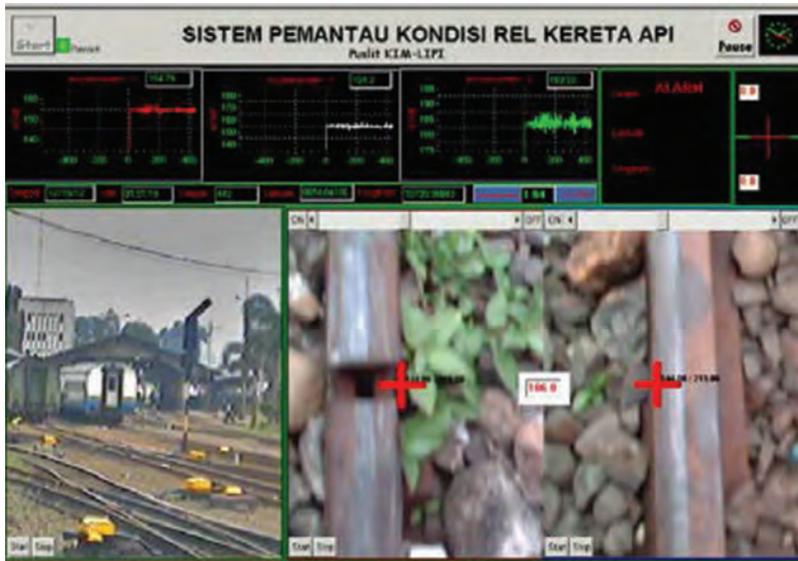
Grafik pengukuran vibasi rel putus pada sumbu X terdapat pada Gambar 35. Pada bagian paling kiri terlihat penunjukan naiknya nilai amplitudo walaupun tidak terlalu besar. Pada sumbu Y (Gambar 35 bagian tengah), tidak terlihat adanya kenaikan amplitude. Ini menandakan tidak adanya pergeseran di saat terjadinya putus rel. Pada grafik pengukuran rel putus pada sumbu Z (Gambar 35 bagian kanan), terlihat adanya kenaikan amplitude yang signifikan ketika terjadinya putus rel.

Pengamatan menggunakan kamera vision akan sangat membantu dalam pemeriksaan rel kereta api jika dilakukan bersamaan dengan pemeriksaan JPJ. Dalam hal ini, dapat melengkapi fungsi JPJ yang memeriksa kondisi rel dengan berjalan kaki dan mengamati kondisi rel putus secara langsung. Pengamatan hasil rekaman dari dua buah kamera vision terlihat pada Gambar 36.



Gambar 36. Tampilan Hasil Perakaman Kamera Vision untuk Pendeteksian Kondisi Putus Rel Kereta Api

Selain vibrasi dan pendeteksian kondisi rel secara bersamaan, kondisi lingkungan juga direkam menggunakan kamera vision jarak jauh. Pada tampilan monitor ditampilkan alarm. Alarm ini akan muncul jika terjadi lonjakan vibrasi yang dianggap cukup besar dan mempunyai dampak pada kondisi rel kereta api. Pengamatan monitor secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 37.



Gambar 37. Tampilan Hasil Pendeteksian Kondisi Rel Kereta

Data hasil pengukuran diproses menjadi data yang siap disimpan dalam format excel dan ditampilkan dalam bentuk menarik. Kemudian digunakan sebagai data informasi, dan disimpan dalam bentuk basis data dengan parameter pengukuran yang disimpan meliputi: tanggal pengukuran, waktu, nomor, simpangan arah sumbu X, simpangan arah sumbu Y, simpangan arah sumbu Z, posisi *latitude*, posisi *longitude*, kecepatan kereta, alarm simpangan sumbu X, alarm simpangan sumbu Y, dan alarm simpangan sumbu Z.

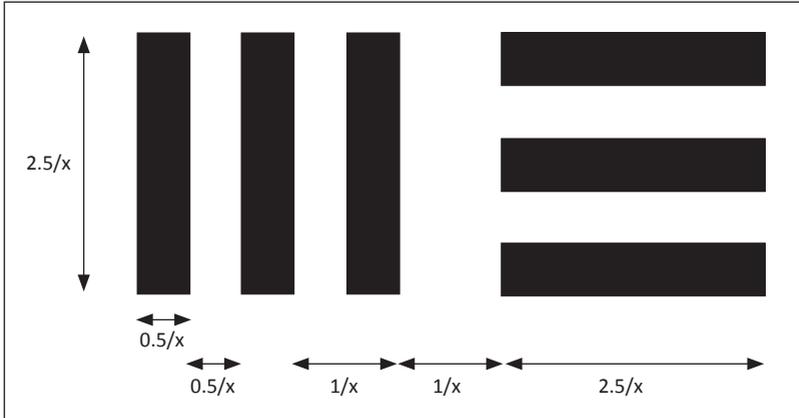
Data rekaman dapat dikirim ke pusat pengendalian perjalanan kereta api untuk digunakan sebagai data *monitoring*. Data rekaman hasil pengukuran dengan format excel dapat dilihat pada Tabel 8. Format excel dipilih karena memudahkan pengoperasian dan dapat ditransfer dalam bentuk laporan harian. Data rekaman dapat pula digunakan untuk melakukan analisis kondisi rel kereta api dari waktu ke waktu dan untuk mengetahui sejarah kondisi rel tersebut.

Data rekaman dibutuhkan untuk pengecekan seberapa besar guncangan yang terjadi—yang ditunjukkan oleh data hasil rekaman lapangan—dan besarnya amplitudo getaran yang terekam. Sementara itu, tabel besarnya amplitudo masih dalam satuan millivolt [mV] dan harus dikonversi dalam satuan yang diinginkan dengan sensitivitas sensor akselerometer yang digunakan sebesar 270 [mV/G]. Ini menandakan sensor akan menunjukkan 270 mV setiap kenaikan akselerasi sebesar 1 G.

Untuk mendapatkan hasil pengukuran data lapangan (dalam bentuk excel) pada tempat-tempat yang mengalami gangguan dengan cepat, dapat dilihat dari posisi saat terjadinya alarm. Posisi yang ditunjukkan pada hasil pengukuran dalam satuan *latitude* dan *longitude* selalu dibandingkan dengan *latitude* dan *longitude base* agar akurasinya dapat dipertahankan walaupun diukur pada tempat yang sama dengan waktu pengukuran berbeda. Alat pendeteksi ini hanya digunakan untuk mengetahui posisi rel putus dan sekaligus melihat kondisi rel putus secara vision. Untuk menetapkan kerusakan rel putus secara kualitatif, diperlukan analisis kualitatif menggunakan *computer vision* atau menggunakan data hasil pengukuran vibrasi. Cara praktis untuk menentukan besarnya putus rel yang terjadi, dapat menggunakan 1951 USAF 3-bar *resolving test power chart*, seperti pada Gambar 38.

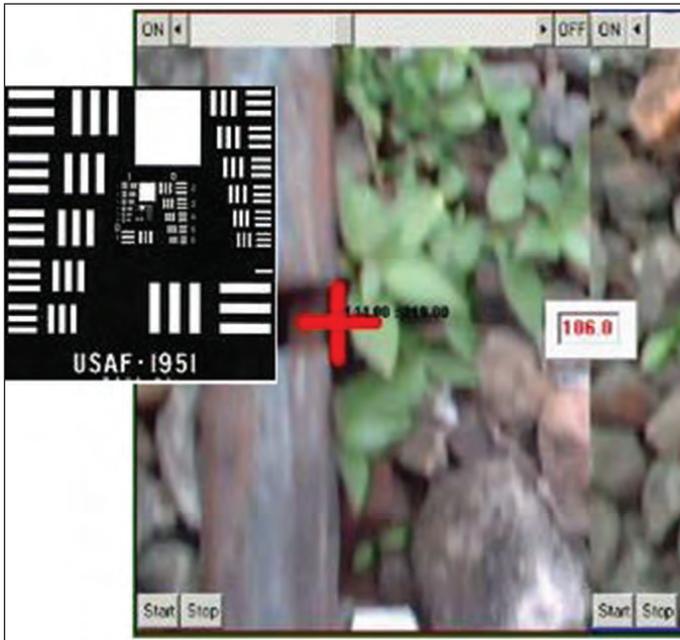
Tabel 8. Data Rekaman dengan Format Excel

Tanggal	Waktu	Samp	Sb. X	Sb. Y	Sb. Z	Latitude	Longitude	Kec.	Alm X	Alm Z
12/15/12	01:50:38	118	154.79	153.32	182.62	654.8438	10735.95	0.26	156.74	
12/15/12	01:50:38	118	152.83	154.79	187.01	654.8438	10735.95	0.26	156.74	187.01
12/15/12	01:50:38	120	156.25	156.74	184.08	654.8438	10735.95	0.26	156.74	187.01
12/15/12	01:50:38	120	155.27	155.76	182.13	654.8438	10735.95	0.26	156.74	187.01
12/15/12	01:50:38	122	156.25	155.27	184.08	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.01
12/15/12	01:50:38	122	155.76	155.27	185.55	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.01
12/15/12	01:50:39	124	153.32	155.76	183.59	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.01
12/15/12	01:50:39	124	153.32	155.27	185.06	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.01
12/15/12	01:50:39	126	156.74	156.25	183.59	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.01
12/15/12	01:50:39	126	155.76	155.27	184.08	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.01
12/15/12	01:50:39	128	154.79	155.27	187.5	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:39	128	153.32	155.27	186.52	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:39	130	156.25	156.25	181.15	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:39	130	156.25	154.79	180.66	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:40	132	154.79	154.79	182.13	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:40	132	153.32	156.25	186.04	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:40	134	155.27	155.27	182.62	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5
12/15/12	01:50:40	134	156.74	156.25	180.66	654.8437	10735.95	0.71	156.74	187.5



Gambar 38. 1951 USAF 3-bar *Resolving Test Power Chart*

Contoh sederhana penentuan lebar putus rel adalah dengan *bar chart* di atas gambar yang dideteksi, seperti pada Gambar 39.



Gambar 39. Mendeteksi Lebar Putus Rel

Lebar putus rel yang terdeteksi menggunakan *bar chart* sebesar $4/x$ mm maka besarnya lubang putus rel adalah:

$$dS = \frac{4 \text{ mm}}{x} = \frac{4 \text{ mm}}{2^{-2}} = 16 \text{ mm}$$

Adapun ketelitian lokasi letak putus rel ditentukan oleh ketelitian GPS mempunyai ketelitian sebesar 10 meter.

BAB 6

PENUTUP

Instrumentasi pendeteksi rel kereta api adalah perangkat elektromekanik yang berfungsi menggantikan fungsi indra manusia. Indra penglihatan digantikan oleh kamera, indra peraba digantikan oleh akselerometer, dan penetapan posisi pengukuran menggunakan GPS. Pada terapannya, instrumentasi pendeteksi rel kereta api mampu menanggulangi masalah kondisi rel kereta api dan melengkapi fungsi JPJ (Juru Pemeriksa Jalan Rel) secara terbatas. Pemantauan kondisi rel kereta api dilakukan oleh JPJ menggunakan lori kereta api. Selain menggunakan lori kereta api, pemantauan dapat dilakukan oleh kereta api reguler. Caranya dengan menempatkan peralatan pendeteksi kondisi rel di kereta api sehingga kereta api akan mencatat semua kejadian terhadap rel yang dilewatinya. Kegiatan ini sudah dilakukan pada kereta api cepat di negara maju.

Sistem pemantauan kondisi rel kereta api yang dipasang di atas kereta lori terdiri atas kamera, akselerometer, dan GPS. Sistem ini mempunyai beberapa keunggulan, yaitu

- 1) Objek dapat dilihat langsung sehingga perubahan yang terjadi dapat dibuktikan dalam bentuk gambar dan terekam.

- 2) Penempatan kamera sebagai sensor vision dapat dilakukan dengan mudah.
- 3) Jika terjadi kerusakan akan mudah didapat penggantinya dan layanan purnajualnya mudah dijangkau.
- 4) Harga sangat murah dan mudah didapat.
- 5) Akselerometer yang digunakan adalah tipe komersial dengan spesifikasi industri sehingga tahan ditempatkan pada medan yang ekstrem.

Akselerometer dapat menginformasikan terjadinya gangguan rel terhadap tiga posisi, yaitu X untuk arah depan, Y untuk arah samping, dan Z untuk arah atas dan bawah. Informasi posisi lori saat pemeriksaan didapat dari GPS. Pengukuran vibrasi yang dilakukan dengan menggunakan lori kereta api dapat pula dilakukan di atas kereta api reguler. Pengukuran yang demikian dapat mewakili kondisi rel kereta api sesungguhnya.

Sistem pemantau kondisi rel kereta api sangat dibutuhkan di masa mendatang mengingat ketergantungan warga Jakarta dan sekitarnya terhadap mode transportasi kereta api sangat tinggi. Gangguan kecil pada sarana kereta api akan berdampak sangat besar. Penyempurnaan sistem pemantau kondisi kereta api sangat diperlukan demi terwujudnya kemandirian dalam pengoperasian sarana kereta api. Jika hal itu dapat direalisasikan, masyarakat akan merasa nyaman dalam menggunakan sarana transportasi kereta api. Untuk itu, kami mengundang para peneliti yang berkecimpung dalam penelitian persinyalan kereta api untuk bertukar pikiran dan bergabung dalam penelitian demi memajukan perkeretaapian di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrejasic, Matej. 2008. "Mems Accelerometers." Dipresentasikan pada Seminar di University of Ljubljana, Faculty for Mathematics and Physics, Department of Physics, Maret 2008.
- Barragam, A., P. Cembrero, N. Caceres, F. Schubert. 2011. "Automated and Cost Effective Maintenance for Railway." *Seventh Framework Programme Theme SST.2010.5.2.1. Automated and cost effective railway infrastructure maintenance*. ACEM-Rail. Diakses pada tanggal 31 Mei 2015. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812028182>.
- Comer, Douglas E. 2011. *Computer Networks and Internets*. Sixthth edition. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Department of the Army and the Air Force. 1991. *Technical Manual: Railroad Track Standards* TM 5-628/AFR 91-44. Department of the Army and the Air Force. Diakses pada tanggal 2 Mei 2012. <http://sms.cecer.army.mil/Shared%20Documents/Downloads/RAILER/T04-TM5-628.pdf>.
- Donovan, John J. 2000. *Systems Programming*. New York: Mc Graw-Hill.
- El Rabbani, Ahmed. 2002. *Introduction GPS: The Global Positioning System*. Norwood: Artech House Inc.
- Esveld, Coenraad. 2001. *Modern Railway Track*. Second Edition. The Netherlands: Delft University of Technology, MRT-Production. Diakses pada tanggal 14 April 2012. http://www.esveld.com/MRT_Selection.pdf.

- Keller, Richard L. 2003. "Railway Track Design." Dalam *Practical Guide to Railway Engineering*. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance (AREMA). Diakses pada tanggal 14 April 2012. <http://www.engsoc.org/~josh/AREMA/chapter6%20-%20Railway%20Track%20Design.pdf>.
- Meirovitch, Leonard. 2001. *Fundamentals of Vibrations*. Long Grove: Waveland Press.
- Molina, Luis F, Esther R., J. Riley, John M. Hart, C.P.L. Barkan, Narendra A. 2011. "Condition Monitoring of Railway Turnouts and Other Track Component Using Machine Vision". Dalam *Proceeding of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, 15 November 2010. <http://railtec.illinois.edu/articles/Files/Conference%20Proceedings/2011/Molina%20et%20all%202011.pdf>.
- Nusagps. 2015. Satelit GPS. Diakses pada tanggal 31 Mei 2015. <http://www.nusagps.com/wp-content/uploads/2013/03/gps-satellites.jpg>.
- Peranginangin, Kasiman. 2006. *Aplikasi WEB dengan PHP dan MySQL*. Yogyakarta: ANDI.
- T.W. Moynihan, dan G.W. English Research and Traffic Group. 2007. "Railway Safety Technologies". Railway Safety Review Secretariat. Diakses pada tanggal 11 Mei 2012. <https://www.tc.gc.ca/media/documents/railsafety/Technologies.pdf>.

INDEKS

- .Avi, 65
- Accelerometer*, 42, 43, 69
- Access Point*, 17, 19, 20, 21
- ADC, 16, 33, 46, 51, 53, 54, 65
- akselerometer 3-axis, 12
- akurat, 2, 24, 33, 61
- aman, ix, 2, 5, 20
- Amplitudo, 13, 43, 44, 51, 67, 70, 72
- analisis kualitatif, 72
- Anjlok, 1, 43, 44, 59, 64
- Anomali, 3, 8, 64
- Aplikasi, 4, 11, 12, 37, 38, 41, 80
- Arsitektur open-loop, 12
- Bar chart, 74, 75
- Basis data, 24, 26, 27, 29, 30, 39, 45, 47, 51, 54, 65, 67, 71
- Boggy, 38
- Builder C++, 20, 30, 35, 41, 46, 51, 65
- Cacat rel, 66
- CCTV, 18, 39, 41, 61
- Client*, vii, 19, 27, 46
- Computer vision*, 62, 72
- Darurat, 59
- Defleksi, 50, 57
- DGPS, 31
- Diakses, 17, 30
- Differential positioning*, 10
- Dikonversi, 16, 47, 53, 54, 72
- Displacement*, 14, 15, 16
- Dummy Balise, 10,
- Ekstrem, viii, 60
- Elektromekanik, 7
- Elektronik, 44, 51
- Excel*, 26, 45, 46, 51, 53, 65, 69, 71, 72
- Fluktuatif, 55
- Franson GPS Gate, 26, 28
- Frekuensi, 47
- Gangguan, ix, 3, 6, 8, 31, 37, 59, 60, 72,
- Gelombang periodik, 45, 64
- Gerak Harmonik Getaran, vii, 14
- GIS, xiii, 32, 33,
- Globalisasi, 1
- GPRS, xiii, 32, 33, 35,
- GPS, v, vii, viii, ix, xiii, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 23, 24, 25, 26, 27, 28,

- 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,
39, 42, 44, 45, 46, 47, 51, 53,
54, 65, 67, 68, 69, 75
- GPS Base, 54
- Hardware*, 41
- Hyperterminal, viii, 68
- Industri, 6,
- Inframerah, 4, 17
- Inspeksi, 4
- Inspeksi visual, 4
- Inspeksi Visual in-situ, 4
- Inspeksi Visual Remote (RVI), 4
- Instrumentasi, iv, ix, 1, 2, 7, 51, 77
- Intensif, 2
- Interaktif, 30, 33
- Juru pemeriksa jalan Rel, 77
- Kamera Vision, v, viii, 16, 67, 70
- Kapasitor diferensial, 13
- Kelongsoran, 88
- Kemiringan, v, vii, 38, 40, 41, 42
- Kendaraan roda dua, 2
- Kendaraan roda empat, 2
- Kenyamanan, 38, 64
- Kereta api, ix, xi, xiii, 1, 2, 3, 4, 5, 6,
7, 8, 10, 18, 23, 24, 26, 29, 30,
31, 32, 33, 35, 37, 38, 39, 41,
42, 43, 44, 45, 46, 47, 50, 51,
52, 53, 54, 55, 57, 59, 61, 62,
64, 65, 66, 69, 70, 71, 72, 77
- Kereta api modern, 2
- Kereta api reguler, 5, 65, 77, 78
- Kereta ukur, 5
- Kerucut konformal, 11
- Kerusakan, 3, 8,
- Keselamatan, ix, xi, 2, 4, 38, 44, 51,
- Ketelitian posisi, 10,
- Ketidaksejajaran, 43, 45, 50
- Komputer, vii, 19, 29, 36, 42, 54,
- Komputer jinjing, 54,
- Komputer vision, 59
- Koordinat, 10, 11, 12, 24, 32
- Koordinat geografi, 11,
- Lampu senter, 8
- Lendutan, 67
- Level operator, 63
- Line of sight*, 25
- Lonjakan, 57
- Lori, viii, 61, 62, 67
- Manual, 2, 63
- Map Edit, 29,
- Masinis, 47, 52, 54, 59
- MEMS, vii, 13,
- Metode Tracking, xiii, 2, 24
- Micromachined polysilicon*, 12, 13
- Milimeter, 50, 55
- Mobile Computing*, 35,
- Monitoring*, 24, 25, 28, 33, 35, 54, 72
- Navigasi, 8, 10, 23, 31, 32
- NAVSTAR, 8, 23
- Network card*, 17
- Nyaman, 2, 78, 39
- Objek, 6, 77
- Online*, 3, 33
- Open source software*, 26
- Orbit, 8, 9, 23
- Otomatisasi, xiii, 1
- Paku rel, 8, 43, 51
- Palu, 8
- Pan-Tilt-Zoom kamera, 4,
- Pemantau, xiii, 2, 7, 78
- Pemotretan, 30
- Pendeteksi Kondisi Rel, iv, ix, xiii
- Pengereman, 20, 42, 52, 60
- Pengukuran inersia, 18, 39

Perangkat, vii, 18, 20, 26, 28, 29, 30,
 33, 34, 35, 44, 51, 62,
 Perangkat lunak phiton, 27
 Periode osilasi, 15
 Pesawat penerima, 9, 10
 Peta bimetri, 12
 Peta Digital, vii, 31
 Peta topografi, 12
 Point positioning, 10
 Port USB, 35, 54
Preventif maintenance, 45
 Prototipe, 3, 8,
 Proyeksi merkator, 11
 Putus Rel, vi, viii, 59, 64, 66, 69, 70,
 74,
 Radian per detik, 15
 Real time, 3, 25, 37, 44, 57
 Rel, iv, v, vi, viii, ix, xiii, 3, 4, 5, 23, 37,
 38, 39, 44, 45, 50, 59, 60, 62,
 63, 64, 66, 69, 70, 71, 74, 77,
 Resolusi, 17, 38, 60, 61
 Satelit, vii, 8, 9, 23,
 Secara visual, 59, 67
 Sejajar, 46, 47, 62, 63
 Selokan, 60, 61
 Sensor, vii, viii, 7, 12, 13, 67, 68
Server, vii, 27, 28
 Silikon wafer, 13
 Sempangan, v, 16, 42, 43, 49, 50, 56
 Sinkron, 30
 Sinyal alarm, 3
 Speedometer, 35
 Standar, 17
 Sumbu, viii, 48, 49, 50, 52, 55, 56
 Survei, 11, 24, 25, 26, 28, 30, 31
 Survei geodesi, 11
 Suspensi, vii, 39
 Tarif, 35
 Tebing, 60, 61
 Topografi, 12, 60
 Tracking, v, vii, xiii, 8, 35, 36
 Transportasi, 1, 2, 24, 78
 Transportasi massal, 1
Transverse merkator, 11
 Ultrasound, 4
 USAF, viii, 72, 74
 USB, 28, 35, 54
 Vibrasi, viii, 14, 46, 48, 49, 50, 53,
 55, 56, 69
 Video fiberscopes, 4
 VTS, 35
 Way Point, vii, 29, 30
 Wireless Fidelity, 17
 WLAN, 20, 21
World Geodetic System, 10
 X-ray, 4

BIOGRAFI PENULIS

Daryono Restu Wahono, lahir di Kota Bandung, 18 Februari 1960 adalah seorang peneliti LIPI dalam Bidang Instrumentasi Terapan. Pendidikan S1 dari Universitas Padjadjaran, Bandung, Jurusan Fisika Lulus tahun 1986 dan Pendidikan S2 dari Universitas Indonesia, Jakarta, Jurusan Opto-Elektroteknika dan Aplikasi Laser, Lulus tahun 1998.

Memulai penelitian dalam bidang perkeretaapian pada tahun 2007–2008 dalam program Insentif Ristek dengan judul “Otomatisasi Sinyal Untuk Pemantauan Kereta Api dengan Pemanfaatan Metoda *Tracking* dan Teknologi GPS, GIS dan GPRS”. Pada tahun 2010 dalam Program Temetik LIPI dengan judul “Otomatisasi sinyal untuk peringatan pada perlintasan kereta Api”. Sementara itu, pada tahun 2012–2013 dalam program Insentif Sinas Ristek dengan judul “Sistem Pemantau Kondisi Rel Kereta Api” dan “Kendali Propulsi KRDE Untuk Mendukung ATP”.

INSTRUMENTASI PENDETEKSI KONDISI Rel Kereta Api

Kereta api dianggap sebagai alat transportasi massal yang potensial dan efektif karena mempunyai daya angkut yang besar, waktu tempuh yang terjadwal, dan bebas macet sehingga menjadi salah satu alat transportasi publik yang disukai. Akan tetapi, sering terjadinya kecelakaan kereta api masih menjadi permasalahan yang harus dibenahi. Sarana pemeriksaan kondisi rel kereta api yang belum memadai menjadi salah satu penyebab terjadinya kecelakaan kereta api di beberapa tempat. Untuk itu, dibutuhkan suatu perangkat pendeteksi yang dapat menjamin kondisi rel kereta api yang baik dan aman.

Buku *Instrumentasi Pendeteksi Kondisi Rel Kereta Api* ini mengulas tentang sistem instrumentasi yang dapat digunakan untuk memantau kondisi rel kereta api. Instrumen pendeteksi ini berfungsi memberi peringatan dan mendeteksi apabila ada kerusakan dan gangguan yang terjadi pada rel kereta api dengan memanfaatkan metode *tracking* dan teknologi GPS, GIS, dan GPRS.

Buku ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi para pengambil kebijakan dalam bidang perkeretaapian dan bagi pelaksana lapangan dalam menerapkan sistem perkeretaapian modern sehingga keselamatan dan kelancaran berkereta api dapat ditingkatkan.



Buku Obor

Distributor:

Yayasan Obor Indonesia
Jl. Plajau No. 10 Jakarta 10230
Telp. (021) 319 26978, 392 0114
Faks. (021) 319 24488
E-mail: yayasan_obor@cbn.net.id

LIPI Press

ISBN 978-979-799-839-4



9 789797 998394