



● Septinurriandiani, Redrik Irawan, Tommy Virlanda WN.

# **SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR**

PEMANFAATAN PENGUJIAN TIDAK MERUSAK

# **SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR**

PEMANFAATAN PENGUJIAN TIDAK MERUSAK

Penyusun  
Septinurriandiani, Redrik Irawan  
Tommy Virlanda WN.



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Kementerian Pekerjaan Umum  
[www.pusjatan.pu.go.id](http://www.pusjatan.pu.go.id)

## SISTEM MONITORING KESEHATAN STRUKTUR - PEMANFAATAN PENGUJIAN TIDAK MERUSAK

Septinurriandiani, Redrik Irawan, Tommy Virlianda WNI  
Desember 2012

Cetakan Ke-1 2012, 54 halaman  
© Pemegang Hak Cipta Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan

Cover Luar : <http://www.tyengineering.com/images/large/pm1.jpg>. Inset : [http://img102.fansshare.com/pic87/w/non-celebrity/1200/27682\\_installingsensor.jpg](http://img102.fansshare.com/pic87/w/non-celebrity/1200/27682_installingsensor.jpg)

No. ISBN : 978-602-8256-89-6  
Kode Kegiatan : 14-PPK2-001-107-D-12  
Kode Publikasi : TR-62/ST/2012

Kata kunci : pengujian tidak merusak, sistem manajemen jembatan,  
monitoring kesehatan struktur

### Ketua Program Penelitian:

Redrik Irawan, Puslitbang Jalan dan Jembatan

### Ketua Sub Tim Teknis:

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto

Naskah ini disusun dengan sumber dana APBN Tahun 2012, pada paket pekerjaan Penyusunan Naskah Ilmiah Litbang Teknologi Jembatan Bentang Panjang (2 Naskah Ilmiah Kajian Sistem Interpretasi SHMS Jembatan Bentang Panjang dan Metode Pemeriksaan Khusus Jembatan Bentang Panjang).

Pandangan yang disampaikan di dalam publikasi ini tidak menggambarkan pandangan dan kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum, unsur pimpinan, maupun institusi pemerintah lainnya.

Kementerian Pekerjaan Umum tidak menjamin akurasi data yang disampaikan dalam publikasi ini, dan tanggung jawab atas data dan informasi sepenuhnya dipegang oleh penulis.

Kementerian Pekerjaan Umum mendorong percetakan dan memperbanyak informasi secara eksklusif untuk perorangan dan pemanfaatan nonkomersil dengan pemberitahuan yang memadai kepada Kementerian Pekerjaan Umum. Pengguna dibatasi dalam menjual kembali, mendistribusikan atau pekerjaan kreatif turunan untuk tujuan komersil tanpa izin tertulis dari Kementerian Pekerjaan Umum.

### Diterbitkan oleh:

Kementerian Pekerjaan Umum  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan  
Jl. A.H. Nasution No. 264 Ujungberung – Bandung 40293

### Pemesanan melalui:

Perpustakaan Puslitbang Jalan dan Jembatan  
[info@pusjatan.pu.go.id](mailto:info@pusjatan.pu.go.id)



## Puslitbang Jalan dan Jembatan

**Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan)** adalah institusi riset yang dikelola oleh Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia. Lembaga ini mendukung Kementerian PU dalam menyelenggarakan jalan di Indonesia dengan memastikan keberlanjutan keahlian, pengembangan inovasi, dan nilai-nilai baru dalam pengembangan infrastruktur.

Pusjatan memfokuskan dukungan kepada penyelenggara jalan di Indonesia, melalui penyelenggaraan litbang terapan untuk menghasilkan inovasi teknologi bidang jalan dan jembatan yang bermuara pada standar, pedoman, dan manual. Selain itu, Pusjatan mengemban misi untuk melakukan advis teknik, pendampingan teknologi, dan alih teknologi yang memungkinkan infrastruktur Indonesia menggunakan teknologi yang tepat guna.

### KEANGGOTAAN TIM TEKNIS & SUB TIM TEKNIS

#### Tim Teknis

Prof.(R).DR. Ir. M.Sjahdanulirwan, M.Sc.  
Ir. Agus Bari Sailendra, MT  
Ir. I Gede Wayan Samsi Gunarta, M.Appl.Sc  
DR. Ir. Dadang Mohammad, M.Sc  
DR. Ir. Poernornosidhi, M.Sc  
DR. Drs. Max Antameng, MA  
DR. Ir. Hedy Rahadian, M.Sc  
Ir. Iwan Zarkasi, M.Eng.Sc  
Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto  
Prof.(R).DR. Ir. Furqon Affandi, M. Sc  
Ir. GJW Fernandez  
Ir. Joko Purnomo, MT  
Ir. Soedarmanto Darmonegoro  
Ir. Lanny Hidayat, M.Si  
Ir. Moch. Tranggono, M.Sc  
DR. Ir. Djoko Widayat, M.Sc  
Redrik Irawan, ST., MT.  
DR. Ir. Didik Rudjito, M.Sc  
DR. Ir. Triono Jumono, M.Sc  
Ir. Palgunadi, M.Eng, Sc  
DR. Ir. Doni J. Widiatono, M.Eng.Sc  
Ir. Teuku Anshar  
Ir. Gandhi Harahap, M.Eng.Sc

Ir. Yayan Suryana, M.Sc  
DR. Ir. Rudy Hermawan, M.Sc  
Ir. Saktyanu, M.Sc  
Ir. Herman Darmansyah  
Ir. Rachmat Agus  
DR. Ir. Hasroel, APU  
DR. Ir. Chaidir Amin, M.Sc  
Prof. Ir. Masyhur Irsyam, MSE. Ph.D  
Kemas Ahmad Zamhari  
Dr. Ir. Mochammad Amron, M.Sc  
Djoko Mujanto

#### Sub Tim Teknis

Prof.(R).Ir. Lanneke Tristanto  
Ir. Rahadi Sukirman  
Herbudiman, ST., MT.  
Abinhot Sihotang, ST., MT.  
Ir. Samun Haris, MT.  
DR. Made Suangga  
DR. Aswandy  
Ir. Ahmad Yunaldi

# Kata Pengantar

Jembatan merupakan struktur yang penting dalam sistem jaringan jalan. Struktur yang kompleks dan relatif rentan terhadap kerusakan (baik yang disebabkan lingkungan, manusia, maupun bencana alam) ini membutuhkan sistem perlindungan yang dapat mengurangi resiko dari dampak bahaya tersebut. Salah satunya adalah mempunyai sistem pemeliharaan yang baik.

Agar jembatan dapat melayani lalu lintas sampai mencapai umur rencana diperlukan sistem pemeliharaan yang baik dan didukung dengan sumber daya manusia dan sumber daya alat yang sesuai. Salah satunya adalah sistem manajemen jembatan (BMS). Dalam BMS ini dijelaskan mengenai inventarisasi, pemeriksaan, dan rekomendasi untuk jembatan.

Salah satu hal yang diperlukan untuk pemeliharaan ini adalah melakukan pengujian tidak merusak. Pengujian tidak merusak ini merupakan tindakan lanjutan dari hasil pemeriksaan visual. Pengujian tidak merusak ini dapat berupa suatu sistem monitoring kesehatan atau hanya pemeriksaan khusus yang dilakukan pada elemen tertentu dan tempat tertentu. Monitoring kesehatan struktur dan NDT (pemeriksaan khusus) ini saling melengkapi dimana monitoring kesehatan struktur dapat mengidentifikasi adanya suatu kerusakan pada elemen tertentu di lokasi tertentu, dan NDT dapat mengidentifikasi secara lokal dengan data pengukuran yang lebih akurat, volume/dimensi kerusakan yang lebih jelas, orientasi kerusakan, dan lainnya.

Bandung, Desember 2012

**Septinurriandiani**

*Penyusun*

# Daftar Isi

Kata Pengantar .....	v
Daftar Isi .....	vi
Daftar Gambar .....	vii
Daftar Tabel .....	vii
<b>Bab 1 Pendahuluan .....</b>	<b>11</b>
Latar belakang .....	11
Metodologi dan sumber data .....	12
<b>Bab 2 Sistem Informasi Manajemen Jembatan .....</b>	<b>15</b>
<b>Bab 3 Pengujian Tidak Merusak .....</b>	<b>19</b>
Uji beban statis .....	19
Pengujian Pembuktian Beban .....	20
Diagnosa Pengujian Beban .....	25
Pengujian beban dinamis .....	26
Pengujian Getaran Ambien .....	26
Pengujian Getaran Paksa .....	30
Teknik pemeriksaan NDE .....	33
Pendeteksian Tulangan .....	34
Penetran Testing .....	40
Pengujian Partikel Magnetik ( <i>Magnetic Particle Testing</i> ) .....	40
Pengujian Radiografi (Radiographic Testing) .....	41
Ground-Penetrating Radar (GPR) Systems .....	42
Ultrasonic Pulse Echo .....	44
Impact Echo Testing .....	45
Monitoring Emisi Akustik (Acoustic Emission Monitoring) .....	47
Sistem Pencitraan Termografi Inframerah .....	50
<b>Bab 4 Penutup .....</b>	<b>53</b>
Daftar Pustaka .....	54

## Daftar Gambar

<i>Gambar 1</i> Diagram alir kegiatan Sistem Informasi Manajemen Jembatan .....	17
<i>Gambar 2</i> Pengujian beban statik menggunakan tangki air .....	21
<i>Gambar 3</i> Frame reaksi .....	23
<i>Gambar 4</i> Jadwal untuk pengujian gaya static .....	23
<i>Gambar 5</i> Pembuktian pembebanan jembatan di atas Sungai Ilm in Darnstedt .....	23
<i>Gambar 6</i> Modus pengoperasian kendaraan pembebanan BELFA .....	24
<i>Gambar 7</i> Sistem pemantauan bergerak untuk pengujian getaran ambien .....	27
<i>Gambar 8</i> Data respon Ambient, sinyal percepatan waktu (atas) dan power spectrum (bawah) .....	28
<i>Gambar 9</i> Perubahan fungsi respon frekuensi yang disebabkan oleh meningkatnya kerusakan struktural .....	29
<i>Gambar 10</i> Pemasangan reaksi penggoyang masa (mass shaker) (EMPA) .....	31
<i>Gambar 11</i> Sistem Pemberian Berat, yang dikembangkan oleh KU Leuven .....	32
<i>Gambar 12</i> Tampak bawah dari balok beton bertulang .....	34
<i>Gambar 13</i> Tampak bawah dari pelat beton .....	35
<i>Gambar 14</i> Pemindaian elektromagnetik dari permukaan beton .....	36
<i>Gambar 15</i> Skema dari radiografi .....	37
<i>Gambar 16</i> Lubang bor radiografi .....	38
<i>Gambar 17</i> Metode radar untuk mendeteksi elemen prategang (Pöpel, Flohrer 1995) .....	39
<i>Gambar 18</i> Pengujian penetran cair .....	40
<i>Gambar 19</i> Pengujian partikel magnetic .....	41
<i>Gambar 20</i> Pengujian radiografi .....	41
<i>Gambar 21</i> Catatan GPR -aspal dilapis beton, menunjukkan bukti tambalan kedalaman penuh pada beton [ <a href="http://www.fhwa.dot.gov">http://www.fhwa.dot.gov</a> ] .....	43
<i>Gambar 22</i> Catatan GPR menunjukkan transisi dalam panjang pelat 30-20 meter .....	43

<i>Gambar 23</i> Pengujian ultrasonic .....	44
<i>Gambar 24</i> Plot posisi-waktu diperoleh dengan menggunakan Metode Impulse-Echo.....	44
<i>Gambar 25</i> Skema dari Metode Impact Echo (Sansalone, Street 1995) .....	45
<i>Gambar 26</i> Pengujian impact echo .....	46
<i>Gambar 27</i> Skema sumber AE selama korosi, retakan tegangan korosi (SCC), dan proses korosi fatigue.....	48
<i>Gambar 28</i> Perbandingan NDT dan SHMS (Adams, Douglas E, Health monitoring of structural materials and components-methods with applications, hal 17, 2007).....	53

## Daftar Tabel

<i>Tabel 1</i> Metode utama non-destruktif untuk mendeteksi tulangan baja .....	35
<i>Tabel 2</i> Metode elektromagnetik untuk mendeteksi tulangan baja .....	36

## *Bab 1*

# Pendahuluan

### Latar belakang

Jembatan merupakan bagian penting dari suatu sistem jaringan jalan yang menghubungkan daerah satu dengan yang lainnya. Karena kepentingan tersebut maka keadaan jembatan harus selalu diperhatikan, agar jembatan selalu dalam kondisi baik. Jembatan perlu diperiksa secara periodik agar pengelola mengetahui keadaan jembatan dalam keadaan aman untuk pengguna jembatan.

Salah satu yang sistem yang menunjang untuk menjaga kondisi jembatan adalah Sistem Manajemen Jembatan Indonesia (SIMAJI). Sistem ini berfungsi untuk membuat rencana kegiatan jembatan, perencanaan, pelaksanaan, dan pemantauan secara menyeluruh. Pada Sistem Manajemen Jembatan terdapat bagian Sistem Informasi Jembatan yang kegiatannya mencakup pemeriksaan jembatan, pengelolaan database jembatan, dan data forensik jembatan yang akan digunakan untuk perencanaan teknis, program kegiatan, pelaksanaan hingga preservasi.

Pemeriksaan jembatan merupakan suatu proses pengumpulan data fisik dan kondisi eksisting struktur jembatan. Data hasil pemeriksaan jembatan digunakan untuk merencanakan suatu program pemeliharaan, rehabilitasi, perkuatan, dan pergantian jembatan. Data jembatan dikumpulkan dari berbagai jenis pemeriksaan yang berbeda dalam skala dan intensitasnya, frekuensinya dan secara sifat masing-masing elemen jembatan. Jenis pemeriksaan utama dalam Sistem Informasi Manajemen Jembatan adalah Pemeriksaan Inventarisasi, Pemeriksaan Detail, Pemeriksaan Rutin dan Pemeriksaan Khusus. Pemeriksaan inventarisasi, detail, dan rutin dilakukan secara visual, sedangkan pemeriksaan khusus dilakukan dengan menggunakan peralatan khusus.

Dalam naskah ilmiah akan dibahas mengenai pemeriksaan khusus untuk jembatan bentang panjang. Tujuan dari penulisan naskah ilmiah ini adalah menyediakan referensi untuk pemeriksaan khusus jembatan bentang panjang.

### Metodologi dan sumber data

Metodologi yang digunakan adalah mengumpulkan referensi mengenai pemeriksaan khusus jembatan, khususnya untuk jembatan bentang panjang. Referensi yang dirujuk berupa textbook, jurnal ilmiah, thesis, dan artikel mengenai pemeriksaan khusus. ■



*Bab 2*

# Sistem Informasi Manajemen Jembatan

Pemeriksaan jembatan ini dilakukan untuk meyakinkan bahwa jembatan masih aman berfungsi dan keperluan akan tindakan tertentu untuk pemeliharaan dan perbaikan secara berkala. Pemeriksaan dilakukan mulai dari awal jembatan beroperasi dan secara berkelanjutan selama umur jembatan. Data yang dikumpulkan harus merupakan data yang akurat, lengkap, dan terbaru sehingga hasil yang dikeuarkan dapat dipercaya. Pemeriksaan jembatan yang utama yang dilakukan di Indonesia adalah pemeriksaan inventarisasi, pemeriksaan detail, pemeriksaan rutin dan pemeriksaan khusus.

Pemeriksaan inventarisasi dilakukan pada saat awal untuk mendaftarkan setiap jembatan ke dalam sistem database. Pemeriksaan inventarisasi melakukan kegiatan dengan mencatat data dasar administrasi, geometri, material, dan data tambahan lainnya pada setiap jembatan, termasuk lokasi jembatan dan tipe struktur utama setiap bentangnya. Kegiatan selanjutnya adalah menilai kondisi komponen utama bangunan atas dan bangunan bawah jembatan secara keseluruhan.

Pemeriksaan detail dilakukan untuk mengetahui kondisi jembatan dan elemennya untuk merencanakan penanganan setiap elemen jembatan dan membuat urutan prioritas jembatan sesuai dengan jenis penanganannya. Pemeriksaan ini dilakukan paling minimal tiga tahun sekali atau dengan interval waktu yang lebih pendek tergantung kondisi jembatannya. Pemeriksaan detail juga dilakukan setelah pelaksanaan pekerjaan rehabilitasi, perbaikan besar, penggantian atau pembangunan jembatan baru. Kegiatan pemeriksaan detail ini adalah mencatat semua kerusakan yang berarti pada elemen jembatan, dan menilai kondisinya untuk setiap elemen, komponen dan struktur utama jembatan. Nilai kondisi jembatan secara keseluruhan diperoleh dari nilai kondisi setiap elemen jembatan.

Pemeriksaan rutin dilakukan setiap setahun sekali dengan tujuan untuk memeriksa apakah pemeliharaan rutin dilakukan dengan baik atau tidak, dan apakah diperlukan tindakan darurat atau perbaikan untuk memelihara jembatan agar jembatan dalam kondisi aman dan layak. Pemeriksaan ini dilakukan di antara pemeriksaan detail. Data pemeriksaan rutin ini diperlukan untuk pertimbangan pada saat pemeriksaan detail akan dilakukan.

Pemeriksaan inventarisasi, pemeriksaan rutin dan pemeriksaan detail dijelaskan lebih rinci pada Pedoman

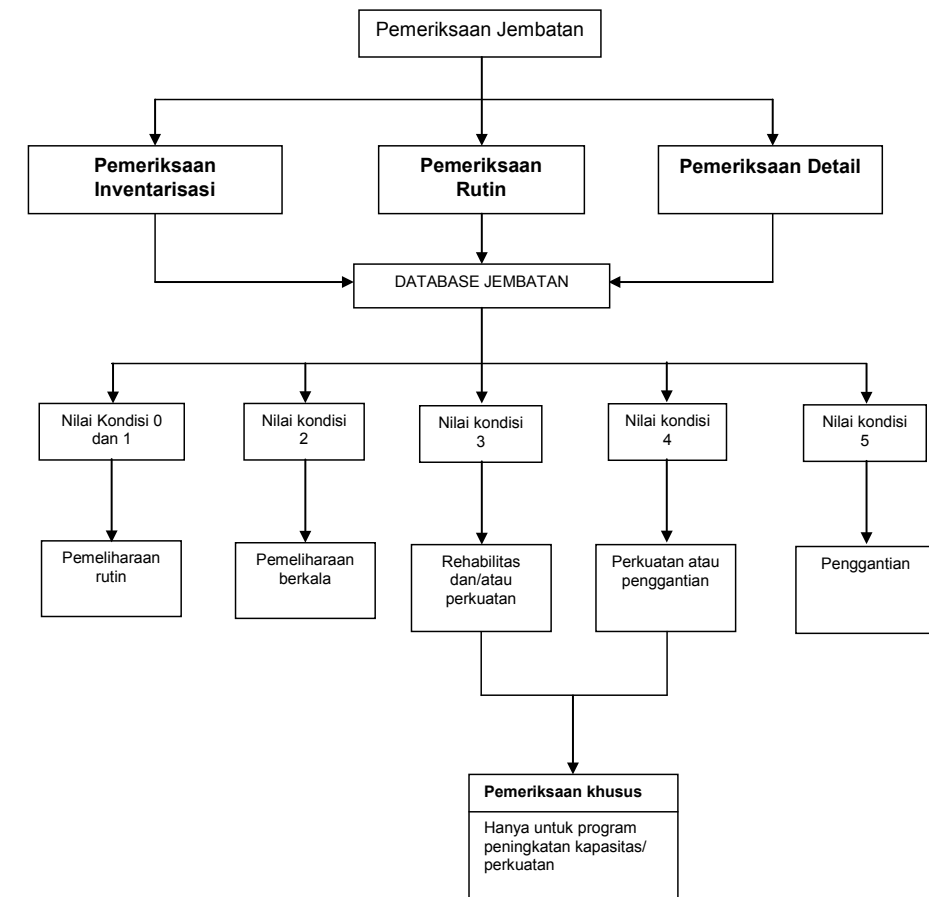
Pemeriksaan Umum Jembatan, Kementerian Pekerjaan Umum.

Pemeriksaan khusus dilakukan apabila diperlukan pemeriksaan lebih lanjut dengan peralatan khusus. Keputusan untuk melakukan pemeriksaan khusus ini diperoleh dari pertimbangan data pemeriksaan detail dan rutin, apakah diperlukan pemeriksaan jembatan yang lebih mendalam. Selain dari data pemeriksaan detail dan rutin, pemeriksaan khusus juga dapat dilakukan apabila pada jembatan tersebut terjadi kondisi ekstrim misalnya terjadi gempa, angin kencang, dan lain-lain.

Pada *Gambar 1* menunjukkan hubungan antara pemeriksaan dalam Sistem Informasi Manajemen Jembatan.

Pemeriksaan jembatan tersebut dilakukan di bawah pengawasan ahli madya pemeriksa jembatan, khususnya pemeriksaan khusus dikarenakan adanya penggunaan peralatan khusus.

Pemeriksaan khusus ini dilakukan pada saat elemen jembatan mengalami kerusakan dan mengukur seberapa parah kerusakannya. Data hasil pemeriksaan ini dianalisis yang hasilnya digunakan sebagai data pendukung pengelola jembatan untuk mengambil suatu tindakan tertentu pada jembatan. Pemeriksaan khusus ini dapat dilakukan secara lokal pada elemen jembatan atau struktur jembatan. Pemeriksaan yang dilakukan secara lokal misalnya



**Gambar 1** Diagram alir kegiatan Sistem Informasi Manajemen Jembatan

untuk mengetahui homogenitas material beton pada elemen gelagar jembatan, mengetahui propagasi retak pada elemen beton gelagar jembatan, mengidentifikasi konfigurasi tulangan pada elemen beton gelagar jembatan dan lain-lain. Sedangkan

pemeriksaan struktur jembatan misalnya melakukan uji beban statis untuk mengetahui kapasitas sisa jembatan, melakukan uji dinamis struktur untuk mengetahui kekakuan struktur, dan lain-lain. ■

*Bab 3*

# Pengujian Tidak Merusak

## Uji beban statis

**P**enurunan jembatan seiring dengan berjalannya waktu dan beban lalu lintas yang semakin meningkat menimbulkan kekhawatiran tentang keandalan dari umur jembatan. Salah satu cara untuk memeriksa keandalan umur jembatan adalah pengujian pembuktian beban. Pengujian pembuktian beban yang sukses menunjukkan bahwa ketahanan langsung dari jembatan lebih besar dari beban pembuktian. Sedangkan pendekatan analitis atau prediksi yang digunakan untuk menentukan peringkat beban mungkin terlalu konservatif. Sebagai contoh, beban yang sebenarnya mengusung kapasitas jembatan seringkali lebih tinggi dari kapasitas yang diprediksi, ini mungkin karena efek sistem, redistribusi beban, dll. Dengan demikian pengujian pembuktian beban atau diagnosa mungkin lebih tepat jika:

- ▶ Analisis analitik menghasilkan penilaian beban yang tidak memuaskan, atau
- ▶ Analisis analitik sulit untuk dilakukan karena kerusakan atau kurangnya dokumentasi.

Sebuah tes diagnosa dapat digunakan untuk menguji atau memprediksi analisis model struktural atau, sementara pengujian pembuktian beban digunakan untuk menilai beban yang sebenarnya mengukung kapasitas jembatan.

Pengendalian beban hidup termasuk kontrol beban dan efek beban. Pendekatan pasif dan aktif harus dipertimbangkan. Masalahnya dapat didekati dari dua arah: (a) deteksi dan kontrol kendaraan yang kelebihan beban, dan (b) verifikasi dari kapasitas beban minimum. Kendaraan yang Kritis dapat diidentifikasi dengan cara pemantauan gerakan jalan masuk. Daya dukung beban yang dibutuhkan minimal dapat diperiksa dengan pembuktian pembebanan. Pengujian umum termasuk torsi, lentur, pengujian beban lentur berputar, aksial, dan gabungan.

### Pengujian Pembuktian Beban

Sebuah tes pembebanan melibatkan proses pembebanan dan pengamatan yang berhubungan dengan reaksi struktur yang sudah ada atau bagian dari itu untuk tujuan penilaian beban dari keselamatan dukungan beban dan kemampuan layan. Hal ini ditandai karena fakta bahwa beban pengujian meningkat setelah sebuah siklus pembebanan yang tetap sampai pengujian

ultimit beban  $F_u$  tercapai. Pengujian beban ultimit  $F_u$  didefinisikan sebagai nilai batas dari beban yang bekerja selama uji beban, di mana hanya ada kerusakan tersebut muncul yang akan mempengaruhi daya dukung dan massa layan untuk seumur hidup di masa depan dari struktur. Sebuah metode keandalan berbasis dapat digunakan untuk menentukan beban pengujian akhir. Metode seperti akan didasarkan pada kerangka probabilitas yang mempertimbangkan usia jembatan, kerusakan, besarnya beban pembuktian, risiko pengujian, diperbaharainya keandalan jembatan (untuk pembebanan massa layan dan beban pembuktian) dan terkait pengambilan keputusan aplikasi seperti analisis risiko-biaya-manfaat.

Pengujian beban pada dasarnya dirancang untuk menyelidiki respon struktur di bawah pembebanan jangka pendek. Jadi instrumentasi yang dipilih perlu respon yang sesuai dan harus memberikan sensitivitas cukup karena regangan dari beban hidup cenderung relatif kecil. Item yang dapat diselidiki dengan tes beban hidup termasuk faktor dampak, distribusi beban lateral, lag geser, dan defleksi vertikal. Namun, juga harus diakui bahwa ada risiko bahwa jembatan akan rusak atau tidak bertahan pada saat pengujian pembuktian beban pembuktian dan pembuktian pengujian beban tidak selalu hemat biaya.

### 1. Metode Pembebanan

Pengujian beban mencakup aplikasi beban uji fisik ke struktur atau bagian dari itu, pengukuran respon struktur di bawah pengaruh beban dan interpretasi hasil untuk membuat rekomendasi untuk program tindakan di masa depan. Meskipun pengujian pembuktian beban dari elemen skala penuh struktural atau struktur lengkap adalah operasi mahal dan memakan waktu, umumnya memberikan hasil yang berharga. Kasus pembebanan tunggal tidak mungkin dapat memberikan berbagai informasi yang diperlukan dan mungkin perlu untuk melakukan serangkaian tes untuk memenuhi persyaratan teknis.

Beban dapat diterapkan menggunakan bobot mati atau dengan cara mekanis dan pertimbangan yang perlu diberikan untuk pengaruh metode pembebanan tersebut terhadap perilaku yang diamati. Bahan yang dapat digunakan, meliputi bahan bangunan, air, besi berat dan kendaraan dimuat. Air adalah cukup mudah untuk menangani dengan memompa tetapi memiliki kelemahan dalam hal kepadatan rendah dibandingkan dengan bahan lain. Dalam hal kegagalan tiba-tiba adalah mungkin bagi air untuk ditambah dengan memompa atau menusuk tangki air.

Bentuk lain dari bobot mati yang digunakan untuk pengujian dalam bangunan membutuhkan tenaga kerja untuk pena-



**Gambar 2** Pengujian beban statik menggunakan tangki air

nganan dan akibatnya mereka dapat lebih lambat dan lebih mahal untuk digunakan. Pengetahuan yang tepat dari beban yang digunakan dapat diperoleh dengan menggunakan berat besi, tetapi biaya penyewaan dan transportasi ini mungkin sangat besar.

Dimana sistem jacking digunakan, tahanan yang diberikan kepada struktur oleh sistem harus diminimalkan dengan menggunakan tempat duduk bola dan rol. Sistem jacking memerlukan girderbaja yang berat untuk dihubungkan di lokasi untuk membentuk *frame* reaksi. Beban diterapkan



pada struktur dengan menggunakan jack hidrolik dan beban mati dari blok beton. Framework menyediakan sebuah platform yang stabil dimana defleksi vertikal jembatan dapat diukur. Responnya dapat diukur dengan extensometers dan strain gauge. Masalah utama dengan sistem *jacking* adalah kebutuhan untuk memberikan reaksi dan kesulitan dalam menghasilkan beban terdistribusi kecuali frame penyebar atau *jack* yang digunakan dalam jumlah besar.

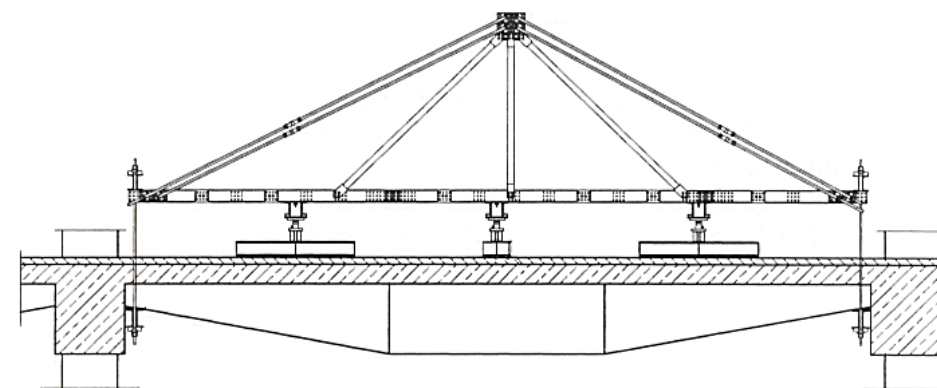
Untuk menghindari kerusakan yang tidak perlu pada struktur akibat beban pembuktian, dianjurkan untuk meningkatkan beban secara bertahap dan untuk mengukur deformasi. Oleh karena itu, beban diterapkan pada struktur sesuai dengan jadwal pembebanan dan diadakan untuk jangka waktu tertentu. Lendutan tersebut kemudian dicatat dan kenaikan beban berikutnya diterapkan. Ini diulang untuk semua langkah dalam jadwal pembebanan. Hasilnya kemudian dapat digambarkan secara grafis sebagai grafik beban/perpindahan. Pengukuran juga dapat memberikan wawasan yang lebih baik perilaku sistem. Secara umum beban pembuktian tidak dapat menutupi dengan efek jangka panjang. Efek ini harus dikompensasi dengan perhitungan.

Untuk struktur baja dan beton bertulang tes pembuktian beban sering dianggap

berhasil jika deformasi akhir dari struktur kurang dari sekitar 25% dari deformasi maksimum, menunjukkan bahwa perilaku inelastis sebesar ini dapat ditoleransi untuk jenis baja yang digunakan. Untuk beton bertulang modern dengan menggunakan baja dengan kapasitas leleh kurang jelas ini mungkin optimis. Yang penting, tes pembuktian beban mengatakan apa pun tentang seberapa dekat pembuktian beban mungkin mendekati ke kapasitas ultimate struktur, berapa banyak sisa-sisa daktilitas, dan apakah belum ada beberapa kerusakan yang disebabkan oleh pengujian itu sendiri.

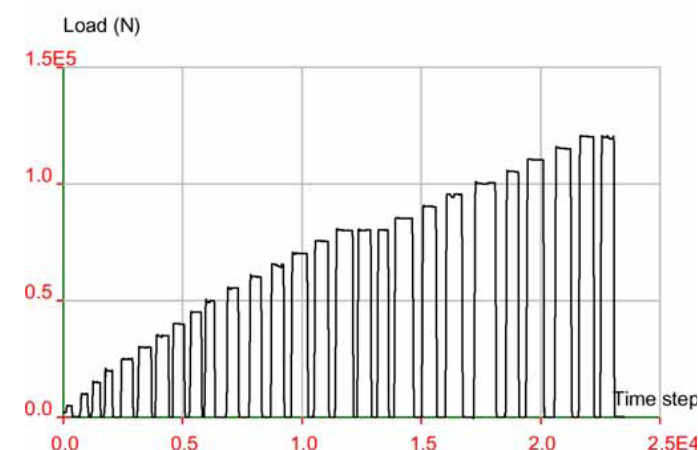
## 2. Truk Pembebanan, Proyek Penelitian –BELFA

Metode konvensional pengujian pembuktian beban yang memakan waktu dan menyebabkan penutupan jalan jangka panjang. Selain itu, mereka menghasilkan perforasi dari penyegelan jembatan, yang melindungi struktur terhadap penetrasi air. Kemungkinan lain untuk menerapkan beban pada struktur adalah dengan menempatkan truk atau lokomotif atau tank militer dengan berat yang diketahui pada beberapa titik dari struktur. Tes ini juga dapat menjadi satu dengan beban tambahan. Pengujian juga dapat dilakukan dengan melewati kendaraan uji atas jembatan pada kecepatan bertahap mulai dari posisi statis.



**Gambar 3** Frame reaksi

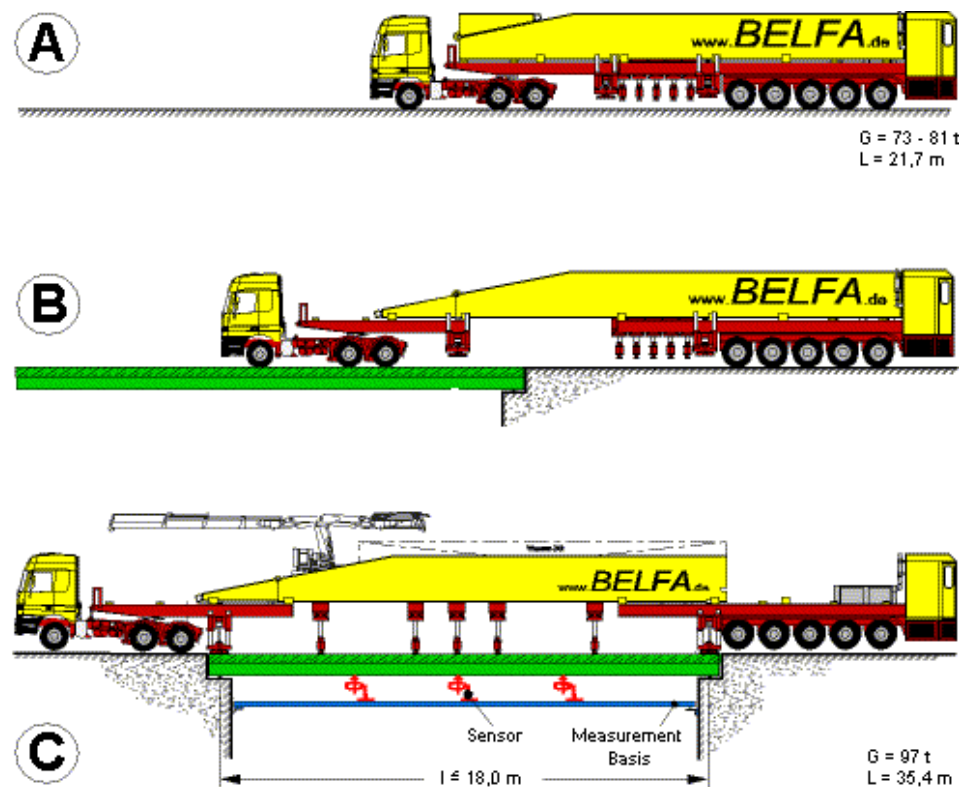
Load-Time (Time step=1s)



**Gambar 4** Jadwal untuk pengujian gaya static



**Gambar 5** Pembuktian pembebanan jembatan di atas Sungai Ilm in Darnstedt



**Gambar 6** Modus pengoperasian kendaraan pembebanan BELFA

Dalam rangka menyediakan metode yang lebih efisien untuk dilokasi tes pembebanan, Hochschule Bremen, TU Dresden, HTWK Leipzig dan Bauhaus-Universitas-Weimar dikembangkan dalam kerjasama dengan perusahaan Eggers dan WEMO sebuah kendaraan pembebanan khusus BELFA. Tata letak modus pengoperasian kendaraan pembebanan ditunjukkan pada *Gambar 6*.

Kendaraan pembebanan BELFA ini dinyatakan sebagai kendaraan khusus

dan menggunakan jalan umum (lihat *Gambar 6.A*). Sebelum traktor mencapai struktur yang akan diuji, as roda belakang terkunci dan traktor menarik keluar bagian depan (lihat *Gambar 6.B*). Selain itu, beban as roda traktor dapat dikurangi dengan memasukkan tiga as rodayang terakhir. Dengan demikian, kerusakan akibat berjalannya secara bebas traktor diatas struktur terjamin. Sebelum roda mendekati bagian belakang struktur, mereka terkunci lagi dan balok utama (kuning) menarik diri

dari bagian belakang. Setelah menyeberangi jembatan, traktor tidak bergerak untuk chassis dan semua as-ditempatkan dan tidak bergerak. Jack hidrolik mengangkat kendaraan dan mengaktifkan seluruh massa untuk tes pembebanan (lihat *Gambar 6.C*). Sekarang, crane, yang diinstal pada gelagar dan dapat bergerak dalam arah longitudinal digunakan untuk memuat pemberat tambahan. Tangki air dapat meningkatkan berat total hingga 100ton. Lima aktuator hidrolik dengan beban maksimum 500kN masing-masing dipindahkan ke posisi uji mereka dan akan melakukan siklus beban yang dikendalikan oleh sistem papan elektronik. Reaksi bangunan dimonitor dengan menggunakan dasar pengukuran independen didukung dan ditampilkan secara on-line pada komputer. Setelah uji pembebanan, kendaraan diubah menjadi modus transportasi dan segera akan siap untuk aplikasi baru. Namun perlu dicatat bahwa penerapan BELFA terbatas pada jembatan jalan hingga rentang (total atau individu) dari 18m.

### Diagnosa Pengujian Beban

Diagnosa pengujian beban mencakup mengendarai berat truk awal yang melintasi jembatan sepanjang berbagai jalur memanjang diberbagai kecepatan merayap (uji static semu) dan dengan kecepatan penuh

(uji dinamis). Berat dari truk dipilih untuk tidak melebihi nilai rating jembatan saat ini. Sebelum pengujian dimulai, banyaknya monting transducer regangan, dan dalam beberapa kasus instrument lain seperti alat ukur defleksi semuanya disiapkan pada lokasi yang telah ditentukan pada jembatan. Pengukuran direkam sebagai pengujian kendaraan yang melintasi jembatan. Dari data yang yang dikumpulkan selama diagnosa pengujian, sejumlah sifat yang mempengaruhi kapasitas beban yang dapat dipikul jembatan dapat ditentukan, Sifat ini, yang biasanya diperkirakan untuk melakukan penilaian beban secara tradisional, termasuk :

- Distribusi beban
- Dukungan tahanan
- Tahanan lentur dari elemen bangunan atas (sifat penampang termasuk keadaan aksi penampang komposit), dan
- Dampak dari impact

Selain itu, regangan yang terekam juga dapat membantu menunjukkan tingkat lainnya, lebih sulit untuk dihitung, sumber kekuatan. Dengan mengumpulkan data respon yang cukup, model struktural yang lebih akurat dari jembatan dapat dibuat dan digunakan di peringkat akhir jembatan

Perlu dicatat bahwa tes diagnosa memiliki manfaat menjelaskan mengapa-jembatan ini tampil berbeda dari yang diasumsikan. Kerugian metode ini, karena

bertentangan dengan pengujian pembuktian beban, adalah bahwa hasil ditentukan untuk beban pelayanan, dan perlu diekstrapolasi ke tingkat beban ultimit.

### Pengujian beban dinamis

Ketika kerusakan struktural yang terjadi adalah kecil atau itu adalah di bagian dalam sistem, deteksi tidak bisa dilakukan secara visual. Yang lebih berguna menguraikan alat evaluasi non-destruktif adalah pengujian dinamis. Hal ini bergantung pada kenyataan bahwa terjadinya kerusakan atau hilangnya integritas dalam sistem struktural menyebabkan perubahan dalam sifat dinamis dari struktur. Misalnya, degradasi kekakuan akibat retak beton bertulang, memberikan informasi tentang posisi dan tingkat keparahan kerusakan yang telah terjadi.

Pandangan sederhana dari pengujian dinamis adalah untuk menganggapnya sebagai prosedur untuk menentukan resonansi frekuensi (alami) dari struktur. Getaran diidentifikasi modus bentuk untuk setiap frekuensi alami sesuai dengan bentuk kerusakan ketika struktur bergetar pada frekuensi tersebut.

Setiap modus getaran dikaitkan dengan nilai redaman, yang merupakan ukuran energi disipasi. Dari respon dinamik yang diukur, disebabkan oleh eksitasi

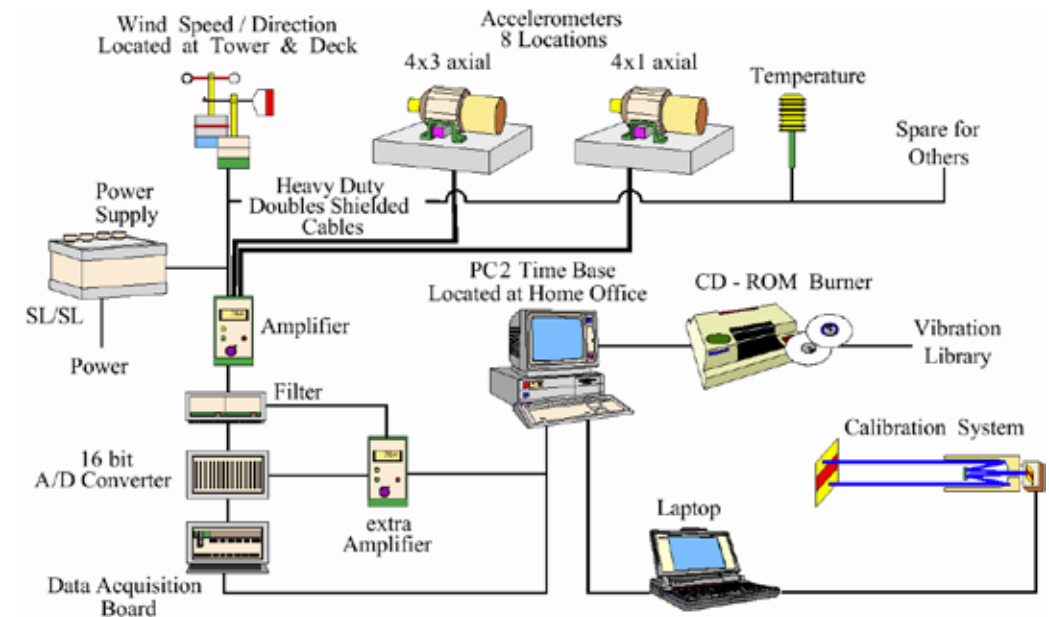
ambien atau dipaksakan, parameter modal (frekuensi alami, bentuk modus dan nilai-nilai redaman modal) dan parameter sistem (kekakuan, massa dan matriks redaman) dapat diperoleh. Parameter ini diidentifikasi kemudian dapat digunakan untuk mengkarakterisasi dan memantau kinerja struktur.

Pengujian getaran bisa digunakan dengan cara terus menerus atau berselang. Dalam sistem pemantauan berkelanjutan biasanya sensor sedikit yang diinstal pada struktur sedangkan sejumlah besar sensor dapat digunakan dalam pemantauan berselang, misalnya untuk memperoleh informasi rinci modus bentuk.

Sayangnya, tidak hanya kesehatan struktur yang mempengaruhi dinamika terukur, tetapi juga eksitasi yang diterapkan dan perubahan suhu merupakan faktor penting dan dapat mengikis potensi pendeteksian kerusakan. Perubahan lingkungan normal seperti siklus metode freeze thaw dari penyangga jembatan mungkin memiliki pengaruh yang besar terhadap perubahan eigen frequencies sepanjang tahun dan dengan demikian harus dipertimbangkan dalam analisis.

### Pengujian Getaran Ambient

Metode pengujian dinamis tanpa kontrol pada input diklasifikasikan sebagai pengujian getaran ambient. Popularitas



**Gambar 7** Sistem pemantauan bergerak untuk pengujian getaran ambient

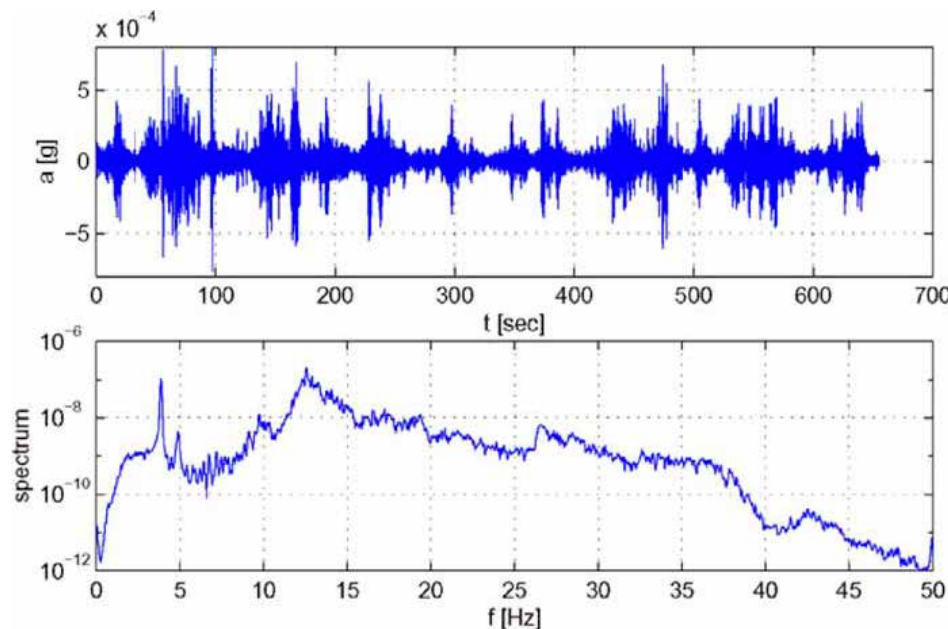
metode ini adalah karena kenyamanan mengukur respon getaran ketika struktur tersebut akibat beban layan. Beban ini dapat dilakukan baik oleh lalu lintas, angin, ombak, kendaraan atau pejalan kaki atau beban layan lainnya. Dengan demikian, sumber ambient mewakili eksitasi yang benar untuk struktur yang terkena selama umur pakai.

Sejak input tidak diketahui, asumsi tertentu harus dibuat tentang sifat dasarnya. Asumsi dasar dari metode ini adalah bahwa gaya eksitasi adalah proses acak stasioner, memiliki spektrum frekuensi yang dapat diterima tetap. Jika asumsi ini benar, maka respon getaran dari setiap struktur yang

dikenakan efek seperti akan berisikan semua mode normal. Pengujian getaran Ambient implisit mengasumsikan respon data saja dapat digunakan untuk memperkirakan parameter getaran.

Prosedur pengujian getaran ambient sangatlah mudah. Pertama model komputasi struktur di bawah pengawasan dilakukan dan frekuensi alami dan bentuk modus yang sesuai telah ditetapkan. Lokasi titik pengukuran dipilih sesuai dengan tata letak geometris struktur, misalnya pada titik-titik pusat dan seperempat span. Accelerometers digunakan untuk pengukuran simultan getaran vertikal, lateral dan longitudinal dari struktur.





**Gambar 8** Data respon Ambient, sinyal percepatan waktu (atas) dan power spectrum (bawah)

Percepatan dari struktur akibat eksitasi ambien biasanya sangat kecil dan dapat bervariasi pada saat akuisisi: sinyal memiliki jangkauan dinamis yang besar seperti yang ditunjukkan pada *Gambar 8*. Hal ini menyebabkan tantangan terhadap sensor, sistem akuisisi dan algoritma identifikasi yang perlu untuk mengambil mode lemah tereksitasi dari data kadang-kadang terganggu.

Perkembangan beberapa tahun terakhir, baik di sisi akuisisi dan juga di sisi identifikasi (misalnya pengembangan metode identifikasi ruang bagian) telah meningkatkan penggunaan tes getaran ambien sebagai teknik monitoring kesehatan non-destruktif.

#### 1. Sistem Identifikasi Untuk Output-Hanya Pengukuran

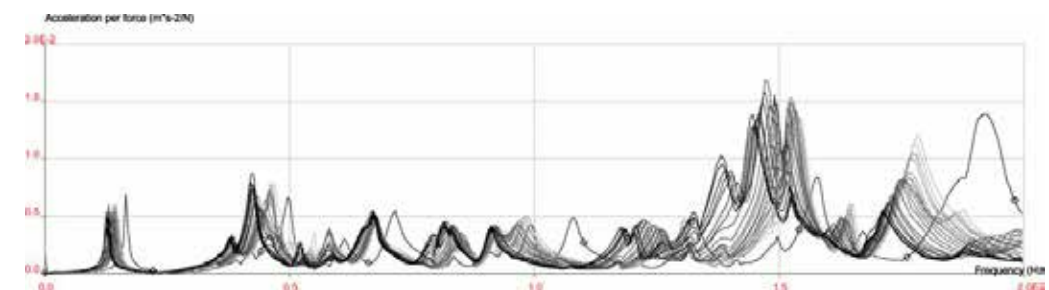
Beberapa metode yang tersedia untuk mengekstrak parameter modal dari struktur dari pengukuran dengan masukan yang tidak diketahui. Pengetahuan rinci eksitasi diganti oleh asumsi bahwa sistem dieksitasi dengan *White Gaussian Noise*.

Sebuah metode yang banyak digunakan dalam teknik sipil untuk menentukan frekuensi eigen suatu struktur adalah metode pemilihan puncak sederhana. Dalam metode ini, riwayat waktu yang diukur dikonversi ke spektrum dengan Transformasi Fourier diskrit (DFT). Frekuensi eigen hanya ditentukan sebagai

puncak spektra. Bentuk modus dapat ditentukan dengan menghitung fungsi transfer antara semua output dan sensor acuan. Keuntungan utama dari metode ini adalah kecepatan: identifikasi dapat dilakukan secara online memungkinkan pemeriksaan kualitas data yang diperoleh di lokasi. Kerugiannya adalah pemilihan subjektif frekuensi eigen, kurangnya perkiraan redaman akurat dan penentuan bentuk pendeksian operasional bukan bentuk modus, karena tidak ada model modal dilengkapi dengan data.

Pendekatan frekuensi domain sederhana dan yang terkenal dan telah meningkat secara signifikan, dan kelas teknik parametrik yang disebut Identifikasi Subruang Stochastic (SSI) telah dikembangkan. Teknik-teknik baru menangani dengan mudah dengan masalah kontaminasi gangguan, mode ruang tertutup dan nilai kompleks bentuk modus.

Model yang paling umum dari sebuah sistem waktu linier invarian dieksitasi dengan gangguan putih yang disebut model ARMAV: istilah auto regresif dari output berkaitan dengan jangka waktu rata-rata bergerak dari input gangguan putih. Berdasarkan pengukuran, metode prediksi kesalahan mampu memecahkan parameter matriks yang tidak diketahui. Sayangnya, hasil metode ini dalam masalah meminimalkan non-linear yang tinggi dengan masalah terkait seperti: konvergensi tidak dijamin, lokal minima, kepekaan terhadap nilai awal dan terutama dalam hal sistem multivariabel, beban komputasi hampir tidak masuk akal. Salah satu solusi yang mungkin adalah untuk menghilangkan persyaratan rata-rata bergerak dari model ARMAV-yang menyebabkan non-linearitas dan untuk memecahkan masalah kuadrat-terkecil linier untuk mencari parameter model ARV. Kerugiannya adalah



**Gambar 9** Perubahan fungsi respon frekuensi yang disebabkan oleh meningkatnya kerusakan struktural



bahwa karena model ini kurang umum, spesifikasi lebih dari tatanan model yang diperlukan yang menghasilkan sejumlah mode numerik alakadarnya.

Metode identifikasi sistem subruang stokastik berbagi keunggulan dari kedua metode tersebut di atas: model yang diidentifikasi adalah ruang model stokastik yang sebenarnya model ARMAV yang berubah, dan karena itu lebih umum dari model ARV; metode identifikasi tidak melibatkan perhitungan non-linier dan karena itu jauh lebih cepat dan lebih kuat daripada metode kesalahan prediksi.

## 2. Kelemahan Dari Pengujian Getaran Ambien

Dalam kebanyakan kasus, sifat eksitasi yang dimasukkan hanya dapat digambarkan oleh parameter statistik atau dengan asumsi spektrum eksitasi terkonsentrasi dalam rentang frekuensi. Jika spektrum pembebanan terbatas pada pita sempit frekuensi, hanya gambaran terbatas dari dinamika struktur dapat dipantau. Pengetahuan yang tidak memadai dari gaya input juga mengimplikasikan secara umum massa dan kekakuan tidak dapat diperoleh.

Meskipun data frekuensi yang handal dan modus bentuk dapat diperoleh, nilai redaman yang diperkirakan rentan terhadap kesalahan. Kesalahan dalam memperkirakan redaman disebabkan oleh

kombinasi faktor seperti bukan yang tak berubah (mungkin) dari proses eksitasi, pemrosesan sinyal dan prosedur analisis data yang diperlukan untuk mengekstrak parameter modal dan eksitasi cukup dari beberapa mode. Perubahan fungsi respon frekuensi tergantung pada amplitudo dari input eksitasi. Hal ini menyebabkan variasi dalam estimasi redaman karena redaman tergantung pada amplitudo getaran. Oleh karena itu, hasil dari eksitasi tingkat rendah mungkin tidak sesuai untuk memprediksi respon dinamis untuk eksitasi tingkat tinggi. Untuk mencapai hasil yang lebih baik, perlu menggunakan teknik eksitasi energi yang lebih tinggi, yang mendekati tingkat beban dinamis yang mungkin ditemui di lingkungan operasi.

## Pengujian Getaran Paksa

Pengujian getaran paksa menggabungkan metode-metode di mana getaran yang diinduksi secara buatan. Amplitudo dan frekuensi eksitasi Input yang diterapkan berada di bawah pengendalian dengan menggunakan sistem eksitasi yang dirancang dengan baik. Tes getaran paksa memiliki keuntungan dari menekan efek gangguan luar dalam respon struktur yang diukur. Pengujian pada struktur lepas pantai menggunakan metode getaran baik ambien dan paksa telah menunjukkan bahwa reda-

man dan frekuensi dapat diukur lebih akurat dengan getaran paksa dan bahwa mode yang lebih tinggi hanya dapat dieksitasi untuk tingkat yang dapat diukur oleh eksitasi paksa.

Sarana fisik di mana eksitasi tersebut direalisasikan dapat disebut vibrator, exciter atau shaker. Ini adalah perangkat yang digunakan untuk mengirimkan kekuatan getaran ke dalam struktur. Perangkat eksitasi dapat berupa tipe kontak, yang berarti bahwa exciter tetap kontak dengan struktur uji di seluruh prosedur pengujian, atau dari jenis yang tidak terjadi kontak seperti tabrakan. Secara fisik perangkat dipasang seperti vibrator digunakan untuk skala penuh pengujian struktur besar. Vibrator kontak yang sesuai biasanya jenis massa berputar eksentrik atau elektro hidrolik.

### 1. Penggetar Masa Berputar Eksentris

Vibrator massa eksentrik menghasilkan kekuatan getaran dengan menggunakan poros berputar membawa massa yang pusat massa dipindahkan dari pusat rotasi poros. Vibrator ini dapat dioperasikan pada frekuensi yang berbeda dengan mengubah kecepatan rotasi poros. Mesin reaksi jenis yang paling sederhana menggunakan massa berputar tunggal. Mesin dengan lebih dari satu massa berputar memiliki keuntungan membangkitkan gaya di lebih dari satu arah. Namun, vibrator massa berputar mampu



**Gambar 10** Pemasangan reaksi penggoyang masa (mass shaker) (EMPA)

memberikan kekuatan hanya sinusoidal yang bervariasi sebanding dengan kuadrat dari kecepatan rotasi sehingga eksitasi handal hanya bisa dicapai di atas 1 Hz.

### 2. Vibrator Elektro hidrolik

Vibrator hidrolik elektro dapat menghasilkan kekuatan lebih tinggi dari jenis lainnya. Gaya ini dihasilkan melalui gerakan bolak balik disebabkan oleh aliran tekanan tinggi dari cairan. Dalam pengoperasiannya, sistem biasanya terdiri dari aktuator sistem yang dikendalikan hidrolik yang akan mengendalikan massa yang diberi-



**Gambar 11** Sistem Pemberian Berat, yang dikembangkan oleh KU Leuven

kan. Berat massa dapat divariasikan untuk mendapatkan berbagai besaran kekuatan. Vibrator memberikan stroke getaran yang relatif tinggi dan memungkinkan eksitasi akurat pada frekuensi yang berbeda pada lentur atau torsi. Mereka juga memiliki keuntungan untuk dapat menerapkan pra pembebanan statis dan bentuk gelombang kompleks dengan struktur uji. Namun, stroke yang dapat dicapai mengurangi dengan meningkatnya frekuensi.

### 3. Pembuat tumbukan (*Impactors*)

Cara paling sederhana penerapan

impak terhadap struktur adalah dengan menggunakan palu terinstrumentasi atau massa tersuspensi untuk memberikan pukulan pada struktur. Dorongan dikirim ke struktur dapat bervariasi dengan mengubah massa pada perangkat pemberi dampak. Rentang frekuensi dampak juga dapat divariasikan dengan mengubah jenis martil. Fungsi impuls terdiri dari spektrum durasi pita pendek yang luas. Lebar dari fungsi menentukan isi frekuensi ketika ketinggian dan bentuk mengendalikan tingkat energi dari spektrum.

Namun demikian, sebuah palu terinstrumentasi jarang digunakan pada struktur yang besar karena massa besar yang terakhir dan resiko kerusakan lokal, pada titik kontak, dengan struktur ketika tingkat kekuatan tinggi diterapkan. Perangkat dampak khusus telah dikembangkan untuk membangkitkan struktur besar, metode tersebut termasuk penggunaan senapan baut atau menjatuhkan pemberat ke struktur. Kemungkinan lebih lanjut untuk menerapkan gaya impulsif untuk struktur yang awalnya diam termasuk pengaruh kendaraan, mengendarai kendaraan di atas permukaan yang tidak rata, dampak roket atau lompatan orang yang dikendalikan.

Dalam pengujian langkah relaksasi, eksitasi dicapai dengan melepaskan struktur dari posisi statis terdeformasi.

Deformasi statis awal diperoleh dengan baik oleh membebaskan struktur dengan kawat atau kabel, hidrolik ekor domba atau daya dorong terus menerus dari motor roket. Respons struktur untuk bentuk eksitasi sangat didominasi oleh mereka yang memiliki terdeformasi mode bentuk menyerupai konfigurasi statis terdeformasi struktur. Meskipun langkah relaksasi mungkin adalah metode yang paling sederhana dan paling efektif untuk menentukan redaman itu jarang digunakan karena kesulitan dalam pelaksanaannya.

### 4. Kelemahan dari Pengujian Getaran Paksa

Jumlah laporan pengujian getaran paksa adalah kurang dari yang dilaporkan untuk pengujian getaran ambien. Faktor yang berkontribusi terhadap ini adalah kesulitan dalam membangun sistem eksitasi yang cocok yang dapat menghasilkan gaya eksitasi yang cukup pada frekuensi rendah. Untuk struktur yang sangat besar, misalnya jembatan kabel stayed bentang panjang, menjadi sangat sulit diterapkan eksitasi buatan yang cukup untuk melampaui tingkat getaran eksitasi dari sekitarnya selalu hadir. Jika struktur memiliki mode frekuensi rendah (di bawah 1 Hz), mungkin sulit untuk membuat mereka tereksitasi dengan shaker, sedangkan ini umumnya tidak ada masalah untuk memberikan

beban atau sumber ambien. Hal ini juga mungkin bahwa tidak semua mode getaran yang diinginkan akan cukup diwujudkan dengan eksitasi transien.

## Teknik pemeriksaan NDE

Jembatan diperiksa untuk setiap kerusakan secara mendadak atau kerusakan seperti tanda-tanda penurunan atau pergeseran, kerusakan pada pelat, girder, railing, kolom atau pilar karena pengaruh dari lalu lintas, erosi dari lereng dll. Untuk pendataan segala jenis kegagalan atau kerusakan yang diamati, bentuk-bentuk khusus yang disiapkan telah diisi dengan, foto dan material bahan yang diserahkan kepada insinyur yang bertanggung jawab untuk tindakan lebih lanjut.

Saat ini tersedia metode untuk mengevaluasi lantai jembatan termasuk memeriksa kondisi lantai secara visual, mendengarkan suara lantai yang terbuka dengan rantai atau palu, pengukuran potensial setengah sel lantai, dan mengambil beton inti. Semua metode ini mungkin memerlukan penutupan jalan dan memiliki kemampuan terbatas untuk mengetahui kondisi internal dari lantai di atas area seluruh lantai. Selain itu, metode ini tidak efektif dalam menentukan secara akurat lokasi yang tepat dan luasnya delaminasi pada lantai jembatan, dan mereka sulit

untuk diterapkan dengan cepat ke banyak lantai jembatan.

Teknik yang biasa digunakan untuk pemeriksaan jembatan meliputi:

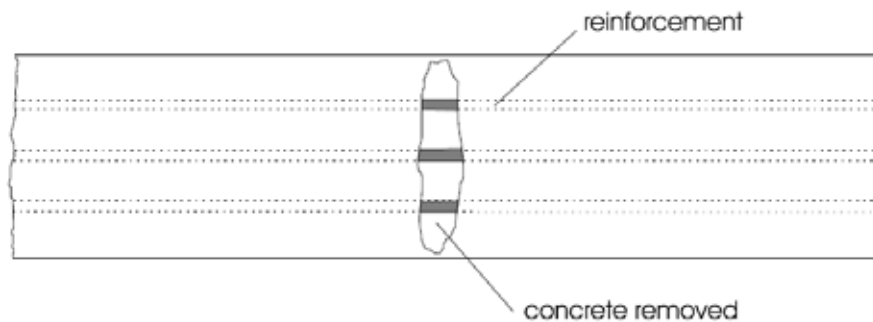
- ▶ Visual Testing (VT)
- ▶ Penetrant Testing (PT)
- ▶ Magnetic Particle Testing (MP)
- ▶ Radiographic Testing (RT)
- ▶ Ultrasonic Testing (UT)
- ▶ Impact Echo (IE)
- ▶ Acoustic Emission (AE)
- ▶ Eddy Current Testing (ET)
- ▶ Rebar Locator (RL)

### Pendeteksian Tulangan

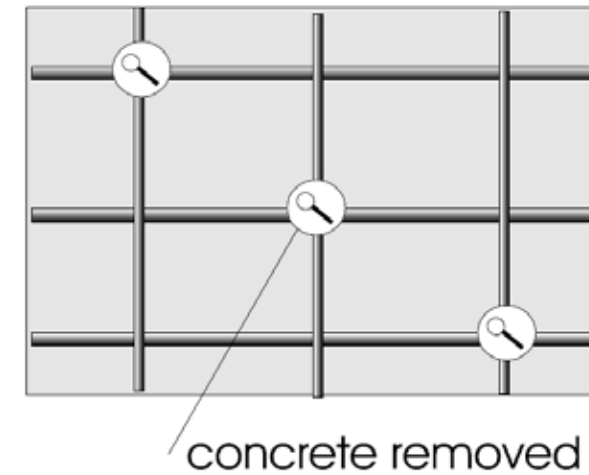
Lokasi dan diameter tulangan baja dapat ditentukan secara merusak atau tidak merusak. Sebagai hasil dari perkembangan pesat dalam pengujian tidak merusak selama dekade terakhir beberapa metode yang handal telah diusulkan. Namun demikian, dalam kondisi tertentu peneliti-

kan destruktif mungkin lebih efisien. Untuk meminimalkan kerusakan pada struktur disarankan untuk mencari tulangan secara statis penting dan yang diharapkan saja. Dalam kasus balok dianjurkan bahwa beton sepanjang jalur kecil di sisi bawah akan dihapus, lihat **Gambar 12**. Nomor, diameter dan selimut beton dapat dengan mudah ditentukan dengan cara ini. Namun, lapisan tulangan kedua yang mungkin dalam kasus-kasus paling praktis tidak akan terdeteksi dengan menggunakan teknik ini.

Untuk mendeteksi tulangan baja dalam pelat beton kombinasi prosedur destruktif dan non-destruktif dianjurkan. Pertama posisi batang baja di kedua arah ditentukan. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan detektor elektro-magnetik baja sederhana. Kemudian, beton akan dihapus pada tiga titik, menurut **Gambar 13**. Dengan cara ini adalah mungkin untuk menentukan diameter baja bahkan jika mereka bergantian.



**Gambar 12** Tampak bawah dari balok beton bertulang



**Gambar 13** Tampak bawah dari pelat beton

Untuk penentuan dari lokasi dan diameter tulangan baja non-destruktif metode kelompok yang tiga besar dapat diidentifikasi, lihat **Tabel 1**.

**Tabel 1** Metode utama non-destruktif untuk mendeteksi tulangan baja

Methods based on	References
electro-magnetic fields	Flohrer 1995; Mehlhorn et al. 1995; Ricken et al. 1995; Alldred et al. 1995; Pöpel et al. 1995
radioactive radiation	Merkblatt B1 1990; Kapphahn 1996; Thiele 1978
Radar	Flohrer et al. 1993; Buyukozturk et al. 1995; Pöpel et al. 1995; Maierhofer et al. 1995

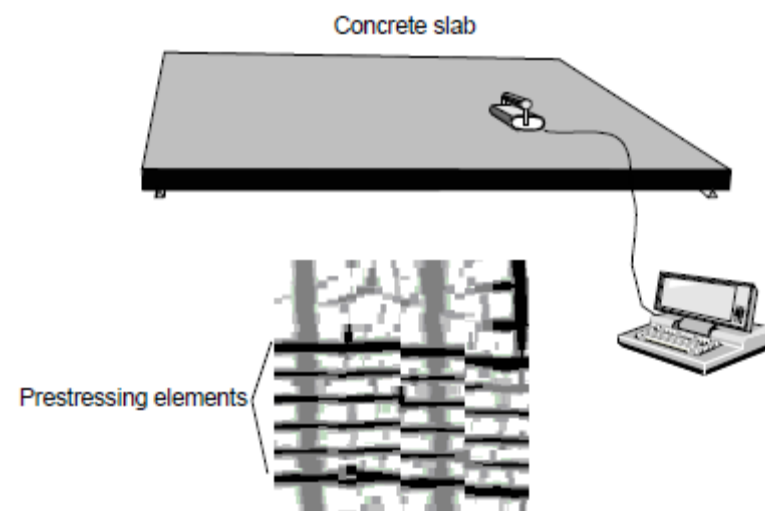
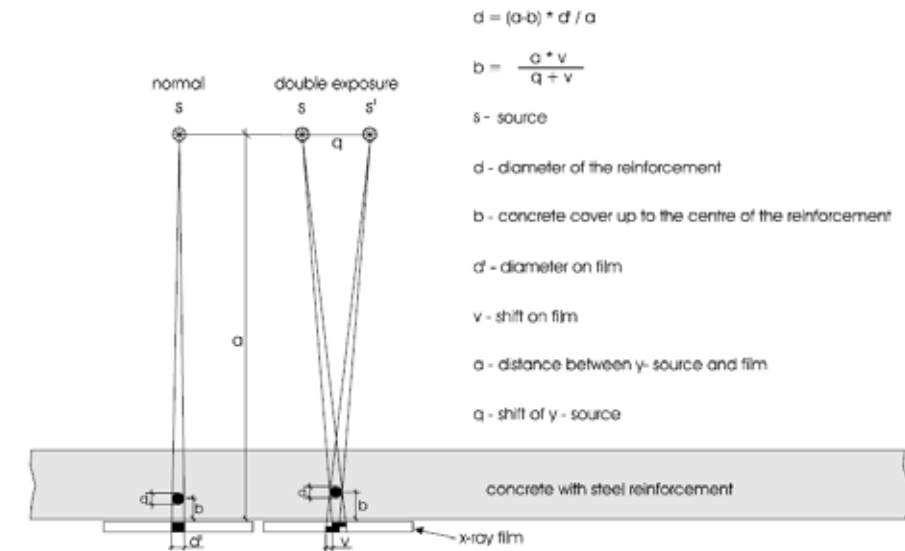
**Tabel 2** Metode elektromagnetik untuk mendeteksi tulangan baja

Physical effect	What can be determined?	Explanation
permanent magnetism	location, concrete cover	The attractive power between the reinforcement and a permanent magnet on the concrete surface is measured.
Electro-magnetic induction	location, concrete cover, diameter	The magnetic flux is influenced by magnetic material in the electro-magnetic field.
Scattering of a magnetic field	location, concrete cover, diameter	First the reinforcement is magnetized by a permanent magnet. Then the magnetic field is measured by using a hall probe. The steel reinforcement causes a scattering of the field.

### 1. Metode Elektromagnetik

Beberapa efek elektro-magnetik telah dimanfaatkan untuk mendeteksi dan memisahkan tulangan baja pada beton, lihat *Tabel 2*.

Efek dari induksi magnetik adalah salah satu yang dominan digunakan pada perangkat komersial. *State-of-the-art* produk memungkinkan sebuah pemindaian mudah dari permukaan beton dan menghasilkan hasil dalam format gambar, lihat *Gambar 14*.

**Gambar 14** Pemindaian elektromagnetik dari permukaan beton**Gambar 15** Skema dari radiografi

Keuntungan dari metode elektromagnetik adalah :

- Selimut beton dapat ditentukan secara andal, sedangkan penentuan diameter batang di kasus-kasus praktis kadang-kadang menyebabkan masalah.
- Hasil yang diperoleh segera. Tidak ada memakan waktu pengolahan pasca yang diperlukan.
- *State-of-the-art* perangkat yang hemat biaya.
- Metode bekerja terpercaya hanya sampai selimut beton sekitar 100 mm.
- Untuk rasio tulangan tinggi resolusi dari metode ini mungkin tidak cukup. (Batangan berlokasi dekat satu sama lain terdeteksi sebagai satu batang.)

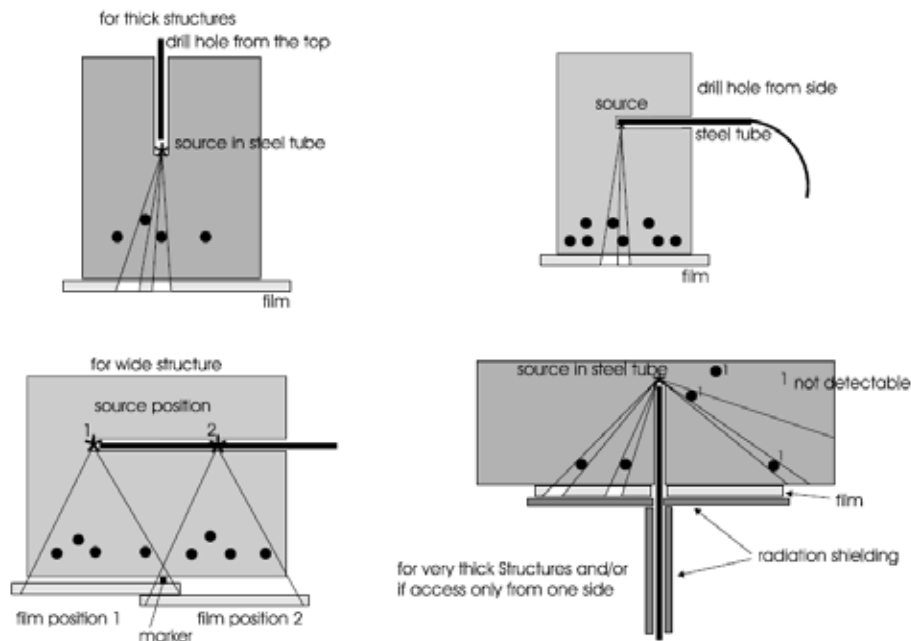
Untuk sebagian besar kasus-kasus praktis, bagaimanapun, metode elektromag-

netik dan perangkat komersial yang sesuai adalah alat yang paling efektif.

### 2. Radiografi

Jika gamma atau sinar-x menembus sampel padat, sebagian dari radiasi melewati sampel, sebagian akan diserap dan sebagian lagi akan tersebar di arah lain. Bagian yang diserap tergantung pada ketebalan dan kerapatan sampel serta pada nomor atom bahan. Karena perbedaan besar dalam kepadatan antara beton dan baja penyerapan gamma atau sinar-x dapat digunakan untuk mendeteksi tulangan baja. Jika sumber radioaktif terletak pada satu sisi elemen beton dan film fotografi di sisi berlawanan proyeksi tulangan akan muncul di film, lihat *Gambar 15*. Jika kedua penutup beton dan diameter batang adalah dua informasi yang





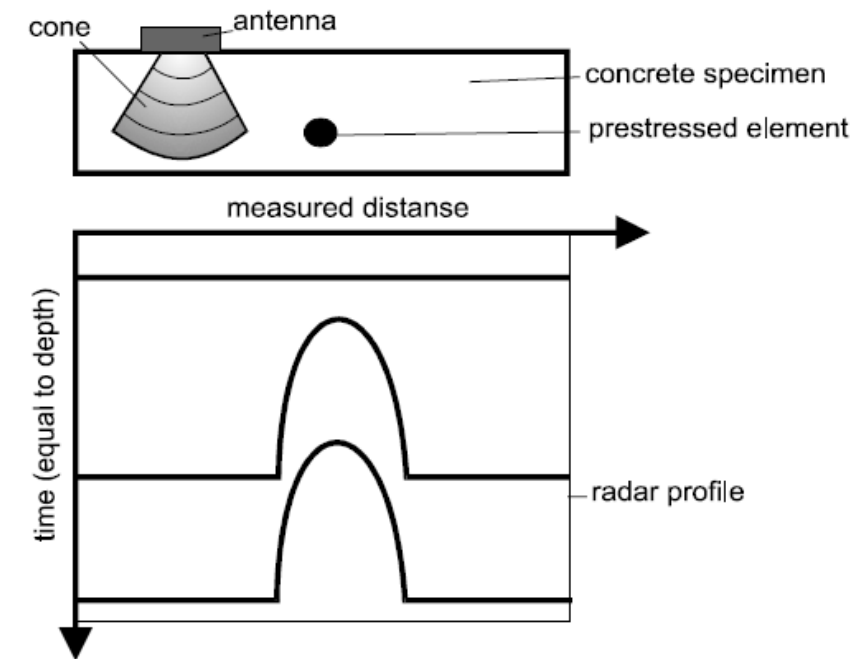
**Gambar 16** Lubang bor radiografi

tidak diketahui adalah cara untuk menentukan variabel tidak diketahui.

Untuk x-ray (200kV) ketebalan beton maksimum adalah sekitar 25 cm dan untuk Co-60 radiasi gamma sekitar 50 cm. Penggunaan akselerator linier memungkinkan ketebalan beton yang lebih besar untuk dipelajari. Waktu paparan praktis berkisar 3 sampai 20 menit. Jika ketebalan lebih dari ketebalan maksimum yang disebutkan di atas, sumber tersebut dapat ditempatkan dalam lubang bor, lihat **Gambar 16**. Prosedur yang sama disarankan jika struktur dapat diakses dari satu sisi saja. Efek tambahan dari radiografi lubang bor merupakan perbaikan dari proteksi radiasi.

Kelemahan dari radiografi adalah biaya yang relatif tinggi, yang disebabkan oleh pekerjaan staf terutama yang terlatih dan perlindungan terhadap radiasi diperlukan. Selain itu, tidak ada informasi on-line disediakan karena perlunya pengembangan film. Di sisi lain, hasil memiliki format gambar yang memungkinkan interpretasi mudah dan dokumentasi.

Radiografi dapat dianggap sebagai opsi yang memungkinkan untuk mendeteksi tulangan baja, jika tidak ada metode lain dapat memberikan informasi yang dibutuhkan. Ini terutama terjadi pada bagian banyak tulangan pada struktur.



**Gambar 17** Metode radar untuk mendeteksi elemen prategang (Pöpel, Flohrer 1995)

### 3. Metode Radar

Medan elektromagnet dipantulkan pada interface antara bahan yang memiliki sifat listrik yang berbeda. Efek ini dapat digunakan untuk mendeteksi tulangan baja dalam struktur beton, lihat **Gambar 17**.

Keuntungan dari prinsip Radar adalah bahwa kedalaman pemeriksaan maksimum adalah sekitar 50 cm, itu berarti lebih besar daripada metode elektromagnetik. Di sisi lain, interpretasi data yang diperoleh tampaknya sulit dan tulangan dekat dengan permukaan beton tidak dapat diidentifikasi dengan jelas. Metode Radar, karena itu, adalah menguntungkan

dalam hal diameter tulangan besar dan selimut beton tinggi. Sebuah aplikasi yang berguna adalah lokalisasi kabel prategang. Dalam hal ini ketidakpekaan terhadap tulangan dekat permukaan tampaknya merupakan keuntungan dari metode ini. Biasanya kabel prategang yang terletak lebih dalam di dalam anggota dari beton bukan tulangan prategang.

### 4. Kesimpulan pada Pendeteksian Tulangan

Untuk alasan praktis, disarankan agar penyelidikan lapangan dimulai dengan menggunakan perangkat pendeteksian

tulangan elektromagnetik. Penghapusan penutup beton pada titik-titik tertentu memungkinkan penegasan dan penyelesaian memperoleh informasi non-destruktif. Dalam keadaan tertentu ini kombinasi metode elektro-magnetik dan destruktif tidak menyediakan informasi yang diperlukan. Dalam kasus lain, metode yang lebih mahal dapat digunakan sebagai tambahan:

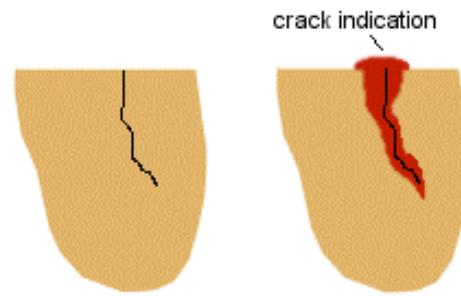
- **Radiografi** untuk struktur banyak tulangan dan ketebalan beton besar
- **Radat** untuk mencari kabel pratekan dengan selimut beton besar

Perlu disebutkan bahwa teknik lainnya telah digunakan untuk mendeteksi tulangan dalam struktur beton juga, diantaranya Metode ultrasonik-Impulse-echo dan thermography Inframerah. Namun, metode ini lebih bermanfaat untuk memecahkan masalah pemeriksaan lain dan tidak dapat direkomendasikan untuk mendeteksi tulangan praktis.

### Penetran Testing

Metode ini digunakan untuk mencari dan mengidentifikasi cacat permukaan material tidak berpori. Bidang lebih lanjut dari aplikasi adalah:

- Pendeteksian retak dan porositas dalam sambungan las
- Pendeteksian cacat permukaan pada produk cor



**Gambar 18** Pengujian penetran cair

- Pendeteksian kelelahan retak pada material tertekan

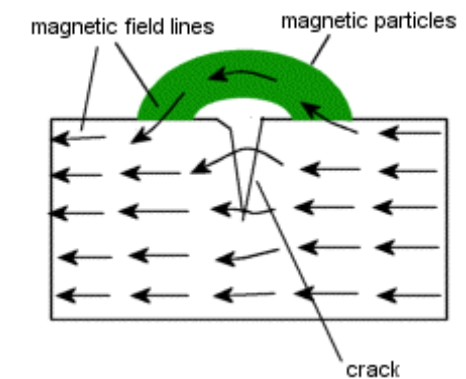
Permukaan bagian yang dievaluasi dilapisi dengan penetran di mana pewarna terlihat atau neon terlarut atau tersuspensi. Penetran ditarik menjadi cacat permukaan dengan kapiler. Setelah masa tunggu untuk memastikan pewarna telah merambah ke celah-celah sempit, yang penetran berlebih dibersihkan dari permukaan sampel. Sebuah bubuk putih, yang disebut pengembang, kemudian disemprot atau membersihkan diatas bagian. Pengembang mengangkat penetran keluar dari cacat, dan noda pewarna pengembang. Kemudian dengan inspeksi visual di bawah sinar putih atau ultraviolet, indikasi pewarna terlihat atau neon, masing-masing, diidentifikasi dan terletak, sehingga mendefinisikan cacat.

### Pengujian Partikel Magnetik (*Magnetic Particle Testing*)

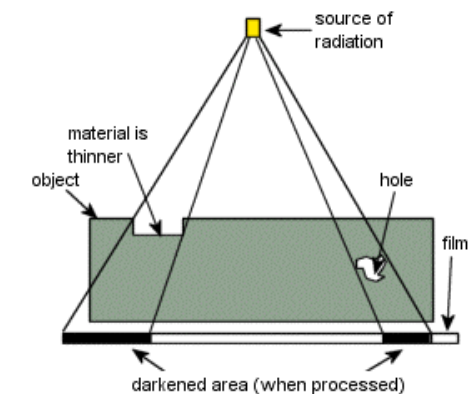
Pengujian Partikel magnetik (MPT) adalah teknik NDT untuk identifikasi retak

yang mengandalkan magnetisasi lokal atau lengkap dari komponen atau permukaan yang sedang diinterogasi. Ini hanya dapat diterapkan pada komponen feromagnetik. Ketika celah hadir di permukaan, kemudian beberapa aliran magnet akan bocor keluar dari sisi retak (asalkan aliran magnet dalam arah yang sesuai relatif terhadap retak).

Dalam *Gambar 19* medan magnet didirikan pada komponen yang terbuat dari bahan feromagnetik. Garis gaya magnetik atau aliran berjalan melalui bahan, dan keluar dan masuk kembali ke material di kutub. Cacat seperti retak atau void diisi dengan udara yang tidak dapat mendukung sebagai aliran banyak, dan memaksa beberapa aliran di luar bagian. Partikel magnetik didistribusikan melalui komponen akan tertarik ke daerah kebocoran aliran dan menghasilkan terlihatnya indikasi. Jika partikel-partikel ini sesuai berwarna, atau latar belakang adalah sesuai berwarna, konsentrasi partikel ini akan meningkatkan citra ada yang retak.



**Gambar 19** Pengujian partikel magnetic



**Gambar 20** Pengujian radiografi

Metode ini dapat digunakan untuk mendeteksi kedua permukaan dan cacat bawah permukaan.

Sistem ini pada dasarnya terdiri dari melewati sinar-x atau sinar gamma melalui elemen yang sedang diuji dan menciptakan sebuah gambar pada film fotosensitif. Jika ada celah di elemen atau kekosongan dalam las-an, radiasi kurang diserap oleh baja dan lebih banyak radiasi melewati daerah itu untuk film. Jadi cacat ditampilkan pada film

### Pengujian Radiografi (*Radiographic Testing*)

Sistem radiografi dapat digunakan untuk mendeteksi kabel yang rusak di jembatan cablestayed, pencitraan pasca-penarikan strand dalam balok beton, dan pendeteksian rongga pada masa pasca-penarikan selongsong yang telah digrouting.

sebagai garis gelap atau daerah yang diarsir, dibandingkan dengan daerah sekitarnya material. Metode ini memiliki keuntungan dari memberikan catatan permanen untuk setiap tes yang dilakukan. Namun, itu memerlukan pengetahuan khusus dalam memilih sudut paparan dan juga dalam menafsirkan hasil yang tercatat pada film. Ini juga membutuhkan akses dari kedua sisi dari area percobaan, dengan sumber radiasi ditempatkan pada satu sisi dan film ditempatkan pada sisi lain.

### Ground-Penetrating Radar (GPR) Systems

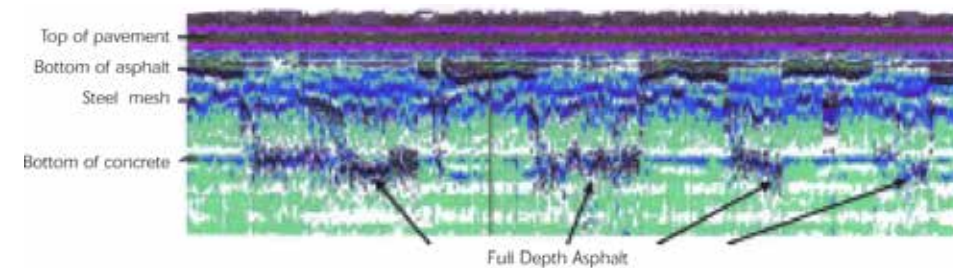
GPR adalah metode pantulan denyut untuk mengukur ketebalan lapisan perkerasan dan properti lainnya. Ia bekerja seperti USG, tetapi menggunakan gelombang radio, bukan gelombang suara untuk menembus trotoar. Dalam aplikasi inspeksi biasa, sistem GPR yang digunakan untuk menemukan komponen struktural, seperti batang tulangan yang tertanam dalam beton, untuk menghindari pelemahan struktur ketika mengumpulkan sampel beton inti untuk pemeriksaan rinci. GPR yang sudah canggih, terintegrasi dengan teknologi pencitraan untuk digunakan sebagai alat evaluasi tidak merusak, dapat memberikan kemampuan untuk cepat menemukan

dan mengkarakterisasi cacat konstruksi dan keausan atau kerusakan akibat usia dalam struktur tanpa membutuhkan teknik destruktif seperti coring.

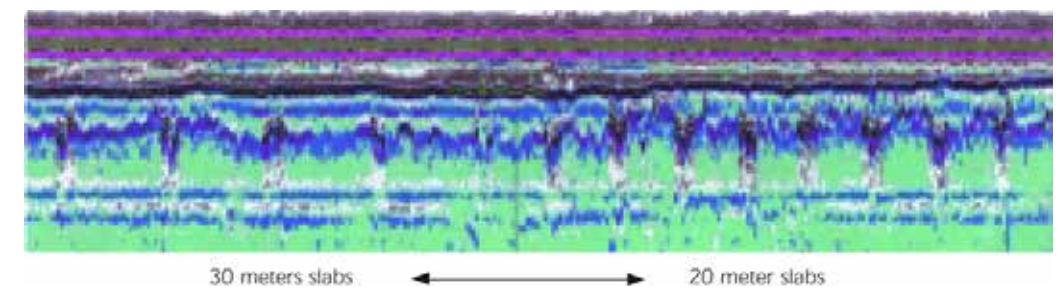
Dek jembatan dan lapis permukaannya adalah bagian paling rentan dari sebuah jembatan terhadap kerusakan dari layanan rutin, dan mereka sangat cocok untuk pemeriksaan menggunakan kendaraan terpasang sistem inspeksi. Sebuah sistem yang canggih GPR dipercaya bisa mendeteksi, mengukur, dan citra delaminasi dalam deck jembatan. Sistem tersebut dirancang untuk beroperasi pada kecepatan jalan raya biasa, menghilangkan kebutuhan untuk penutupan jalur.

Sebuah Ground Penetrating Radar Pencitraan yang bergerak (GPIR) mengumpulkan data untuk rekonstruksi gambar resolusi tinggi dari cacat yang tertanam dan fitur. Kualitas pengolahan gambar yang tinggi memungkinkan visualisasi struktur internal, memungkinkan evaluasi kondisi dek dari data yang dikumpulkan menggunakan antenna sangat luas pita lebar dan generator pulsa. Teknik pengujian GPR dapat menentukan perkerasan ketebalan lapisan serta adanya kelembaban yang berlebihan atau rongga udara berlebihan dalam lapisan aspal.

Konfigurasi dasar dari sebuah peralatan GPR yang bergerak termasuk setidaknya



**Gambar 21** Catatan GPR -aspal dilapis beton, menunjukkan bukti tambalan kedalaman penuh pada beton [<http://www.fhwa.dot.gov>]

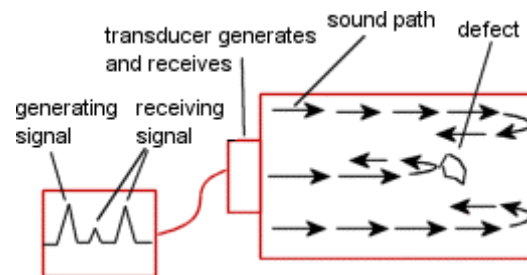


**Gambar 22** Catatan GPR menunjukkan transisi dalam panjang pelat 30-20 meter

nya satu antenna radar dipasang pada kendaraan GPR dengan unit akuisisi data. Antena memancarkan denyut energi radar ke trotoar. Gelombang ini tercermin pada interface lapisan signifikan dan batas-batas bahan yang berbeda di trotoar. Gelombang tercermin ditangkap oleh sistem dan ditampilkan sebagai sebidang amplitudo refleksi terhadap waktu kedatangan. Puncak terbesar adalah refleksi dari permukaan perkerasan, amplitudo sebelum pantulan permukaan dihasilkan secara internal kebisingan dan dapat dihapus dari jejak sebelum pemrosesan sinyal. Refleksi penting

untuk insinyur adalah mereka yang terjadi setelah gema permukaan. Merupakan interface yang signifikan dalam trotoar, dan waktu tempuh diukur berkaitan dengan ketebalan lapisan. Selain menentukan ketebalan lapisan permukaan dari data GPR, nilai dielektrik permukaan dan lapisan dasar adalah kepentingan tertentu karena mereka menunjukkan adanya void kelembaban dan udara di trotoar. Konstanta dielektrik lebih besar dari 16 menunjukkan lapisan jenuh dengan air. Air memiliki konstanta dielektrik 81.

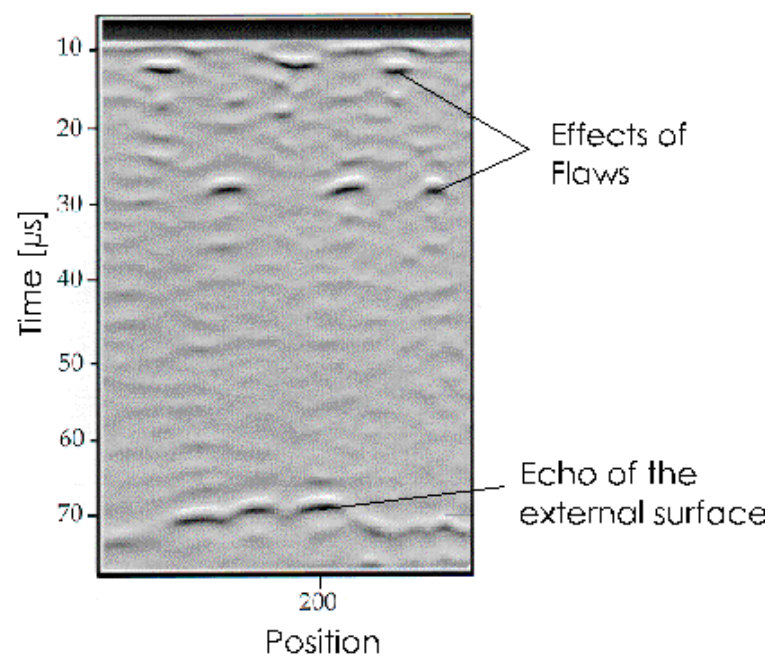




**Gambar 23** Pengujian ultrasonic

### Ultrasonic Pulse Echo

Metode ultrasonik Impulse Echo didasarkan pada mengukur perbedaan waktu antara pengiriman impuls dan menerima gema, lihat *Gambar 23*. Selain itu, intensitas gema diukur. Sebuah transduser mekanikal elektro digunakan untuk menghasilkan denyut pendek pada gelombang tegangan ultrasonik yang menyebar ke objek yang sedang diperiksa. Refleksi dari denyut tegangan terjadi pada batas yang memisahkan bahan dengan kerapatan yang berbeda dan sifat elastis. Denyut mencerminkan perjalanan kembali ke transduser yang juga bertindak sebagai penerima.



**Gambar 24** Plot posisi-waktu diperoleh dengan menggunakan Metode Impulse-Echo

Sinyal yang diterima ditampilkan di osiloskop, dan waktu perjalanan pulang pergi dari denyut nadi diukur secara elektronik. Hasilnya ditampilkan dalam plot posisi-waktu, lihat *Gambar 24*. Jika kecepatan ultrasonik diketahui, waktu dapat berhubungan dengan lokasi dari cacat menyebabkan gema.

Kinerja Metode Impulse Echo dapat meningkat secara signifikan dengan menggunakan susunan sensor daripada sensor tunggal (Jahson, Kroggel, Ratmann 1995).

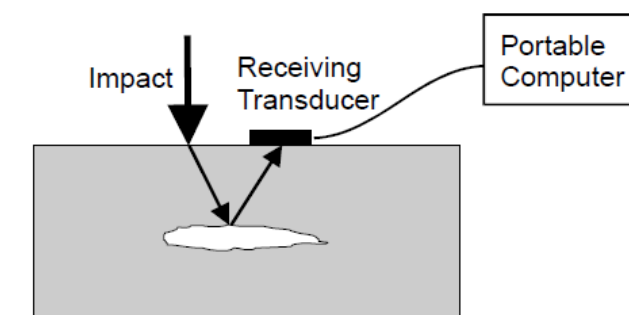
Dalam pengujian nondestruktif logam, teknik ultrasonik denyut gema (UP-E) telah terbukti menjadi metode yang dapat diandalkan untuk mencari celah dan cacat internal lainnya. Upaya untuk menggunakan UP-E peralatan yang dirancang untuk pemeriksaan logam untuk menguji beton tidak berhasil karena sifat heterogen dari beton [Carino dan Sansalone, 1984]. Kehadiran pasta-agregat interface, rongga udara, dan tulangan baja menghasilkan berbagai gema yang mengaburkan mereka dari cacat yang sebenarnya. Namun, untuk menyelidiki homogenitas dalam dinding beton atau pelat beton dengan ketebalan konstan pengukuran kecepatan ultrasonik telah terbukti menjadi metode yang efisien.

### Impact Echo Testing

Metode lain untuk menemukan ketidaksempurnaan dalam beton itu

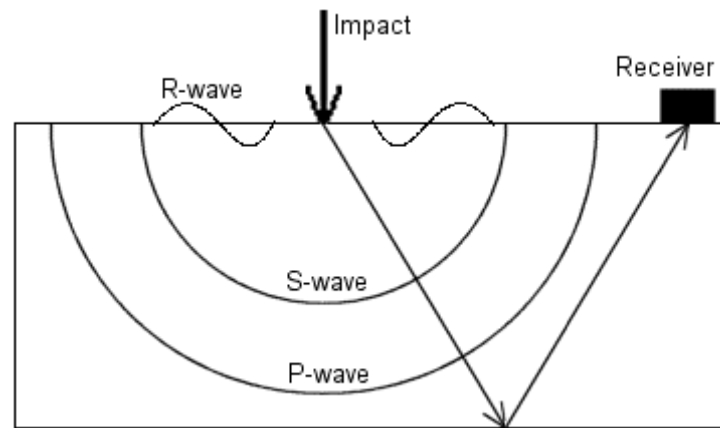
Metode *Impact Echo*. Hal ini didasarkan pada durasi pendek menggunakan mekanikal Impak untuk menghasilkan gelombang tegangan frekuensi rendah (2 sampai 20 kHz, biasanya) yang merambat ke dalam struktur dan terpantulkan oleh kekurangan dan permukaan eksternal (Sansalone, Street 1995). Impak tersebut dapat diproduksi dengan menekan bola baja terhadap permukaan beton atau dengan memukul permukaan dengan menggunakan palu, lihat *Gambar 25*.

Sebagai gelombang tegangan frekuensi rendah merambat melalui struktur, mereka dipantulkan oleh interface udara di dalam struktur dan permukaan eksternal struktur. interface udara yang mungkin dipakai delaminasi, rongga, dan retak. Beberapa refleksi dari gelombang tegangan, antara permukaan impact, cacat, dan / atau permukaan eksternal lainnya, menimbulkan mode getaran, yang dapat diidentifikasi dengan



**Gambar 25** Skema dari Metode Impact Echo (Sansalone, Street 1995)





**Gambar 26** Pengujian impact echo

frekuensi dan digunakan untuk menentukan geometri dari struktur atau lokasi cacat. Sebuah penerima, yang terletak di permukaan dekat lokasi impact, memantau perpindahan permukaan yang disebabkan oleh kedatangan gelombang yang dipantulkan. Catatan dari perpindahan terhadap waktu ditransformasikan ke dalam domain frekuensi untuk kemudahan analisis sinyal. Keberadaan dan sifat dari setiap kesalahan internal atau eksternal interface dapat ditentukan dari analisis bentuk gelombang domain waktu dan spektrum frekuensi.

**Gambar 26** menunjukkan bagaimana gangguan yang diterapkan merambat melalui bagian padat sebagai tiga jenis gelombang tegangan: gelombang P, gelombang S, dan gelombang R. Gelombang P, yang berhubungan dengan penyebaran tegangan normal, dan gelombang S, yang berhubungan dengan tegangan geser,

merambat ke depan bagian yang padat bersama gelombang bola. Selain itu, ada gelombang R yang bergerak menjauh dari lokasi impact sepanjang permukaan. Karena perambatan gelombang tegangan pada bagian yang padat yang terpengaruh langsung oleh sifat mekanik, kecepatan gelombang dapat dihitung berdasarkan modulus elastisitas young, Poisson Rasio, dan kepadatan material.

Ketika gelombang tegangan bepergian melalui material 1 merupakan kejadian pada interface antara 2 material yang berbeda, sebagian dari gelombang yang datang dipantulkan pada amplitudo tergantung pada sudut kejadian. Koefisien pantulan, R, bisa negatif atau positif tergantung pada nilai-nilai relatif dari impedansi akustik kedua material tersebut. Misalnya koefisien pantulan negatif, seperti akan terjadi pada interface beton-udara, menyebabkan tanda

tegangan pada gelombang yang dipantulkan menjadi berlawanan tanda tegangan pada gelombang kejadian. Jadi adalah mungkin untuk membedakan antara pantulan dari interface beton-udara dan dari interface beton-baja.

Gelombang P yang dihasilkan oleh impact mengalami beberapa pantulan antara permukaan pengujian dan interface pantulan. Setiap kali gelombang P tiba di permukaan pengujian, itu menyebabkan perpindahan karakteristik. Dengan demikian bentuk gelombang memiliki pola periodik yang tergantung pada jarak perjalanan pulang-pergi dari gelombang P. Dalam analisis hasil frekuensi impact-echo, tujuannya adalah untuk menentukan frekuensi dominan dalam bentuk gelombang yang tercatat. Hal ini dilakukan dengan menggunakan teknik transformasi Fourier cepat untuk mengubah bentuk gelombang terekam ke dalam domain frekuensi. Hasil transformasi dalam spektrum amplitudo yang menunjukkan amplitudo dari berbagai frekuensi yang terkandung dalam bentuk gelombang. Untuk pelat seperti struktur, ketebalan frekuensi biasanya akan menjadi puncak dominan dalam spektrum. Nilai frekuensi puncak dalam spektrum amplitudo dapat digunakan untuk menentukan kedalaman pantulan interface.

Aplikasi yang umum Pengujian Impact-Echo meliputi :

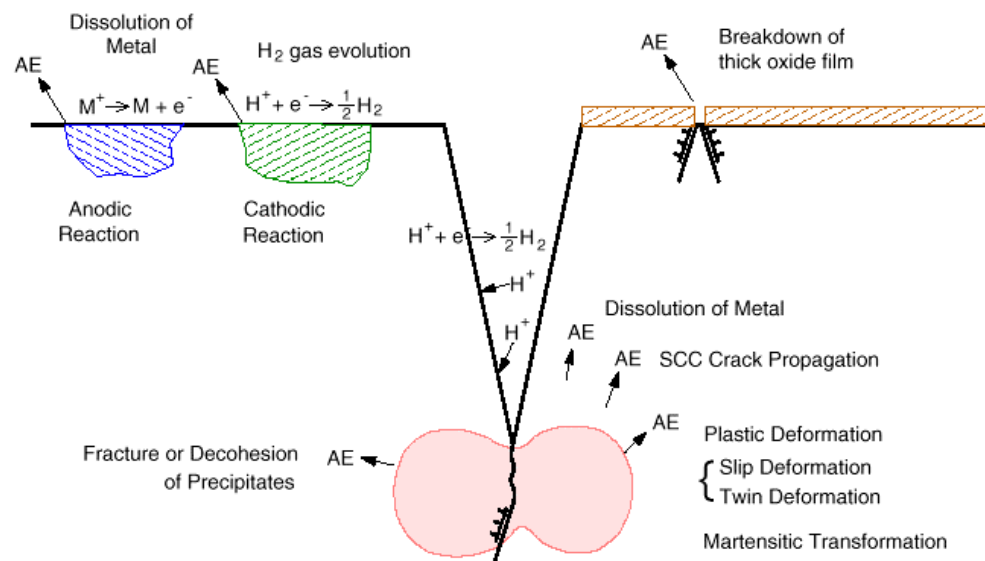
- ▶ pengukuran ketebalan pelat

- ▶ Mendeteksi delaminasi, retak dan rongga
- ▶ Mengevaluasi beton yang tidak terkonsolidasi
- ▶ Menemukan rongga dalam saluran tendon yang telah digrouting
- ▶ Menemukan rongga tanah dasar di bawah pelat pondasi
- ▶ Mengevaluasi poros tambang dan garis terowongan
- ▶ Menemukan rongga dalam batu yang telah digrouting
- ▶ Mengevaluasi kerusakan terdistribusi dalam beton

### Monitoring Emisi Akustik (Acoustic Emission Monitoring)

Emisi Akustik (AE) mengacu pada generasi gelombang elastis sementara selama pelepasan yang cepat dari energi dari sumber lokal dalam suatu material. Sumber emisi ini dalam logam sangat erat kaitannya dengan gerakan dislokasi menyertai deformasi plastik dan inisiasi dan perpanjangan retakan dalam struktur di bawah tegangan. Sumber lain Emisi Akustik adalah: mencair, transformasi fasa, tegangan termal, pendinginan retak dan tegangan terbangun.

Teknik Emisi Akustik NDT berdasarkan pendeteksian dan konversi dari gelombang elastis frekuensi tinggi untuk sinyal elektrik. Frekuensi Tinggi energi akustik yang dipancarkan oleh suatu benda ketika



**Gambar 27** Skema sumber AE selama korosi, retakan tegangan korosi (SCC), dan proses korosi fatigue

sedang mengalami tegangan, seperti ketika produk korosi yang terbentuk di batang terkorosi ini mendorong keluar pada beton sekitarnya. Keuntungan utama memonitoring akustik emisi menawarkan teknik evaluasi yang tidak merusak lebih dari yang konvensional adalah bahwa itu hasil langsung dari proses pertumbuhan cacat. Pertumbuhan Retak yang lambat dalam material getas menghasilkan peristiwa AE sedikit, sedangkan pertumbuhan retak yang cepat di material rapuh menghasilkan jumlah besar peristiwa amplitudo tinggi AE. Produk terbentuknya korosi dan selanjutnya retak mikro dari beton merepresentasikan fenomena terakhir.

Sebuah sistem monitoring AE yang biasa menggunakan sensor akustik piezoelektrik digabungkan dengan benda uji dengan medium kopling akustik yang sesuai, (minyak atau perekat) dan dijamin dengan pita, turunnya ikatan perekat atau pegangan magnetik. Output dari masing-masing sensor piezoelektrik diperkuat melalui pra amplifier kebisingan rendah, disaring untuk menghilangkan kebisingan luar dan selanjutnya diproses oleh peralatan elektronik yang sesuai. Sinyal AE adalah sebuah frekuensi tinggi, seperti yang diharapkan untuk pertumbuhan retak yang cepat dan digeser antara transduser. Seperti pergeseran dalam sinyal AE adalah karena sinyal akus-

tik yang melintasi ke bawah batang ini dan harus memungkinkan sumber lokasi peristiwa AE dan korosi batang ini harus dihitung. Selain itu, monitoring AE mendeteksi korosi lebih awal dari arus galvanik dan pengukuran potensial setengah-sel.

Sensor Emisi Akustik :

- ▶ Sensor pita lebar
- ▶ Sensor Hidrostatik Tekanan Tinggi
- ▶ Sensor Tahanan Radiasi Nuklir
- ▶ Sensor Aperture Variabel
- ▶ Pada hakekatnya Sensor Aman
- ▶ Sensor Miniatur
- ▶ Sensor Air yang ketat dan Bawah Air
- ▶ Rolling Sensor (Kontak Kering)
- ▶ Sensor Airborne
- ▶ Sensor Searah
- ▶ Sensor AE Preamp Integral.

#### 1. Penerapan AE untuk Mendeteksi Retak

Penerapan emisi akustik untuk mendeteksi retakan kelelahan atau korosi kelelahan pada jembatan elemen baja sudah dalam pengembangan selama lebih dari satu dekade. Akustik fisik dari New Jersey, Amerika Serikat dan DNL Technologies dari Kanada telah menguji peralatan mereka di kota pegunungan. Pada awal tahun 90 NYC DOT Inspeksi Jembatan membeli DNL peralatan AE, yang pada dasarnya memindai sinyal di kisaran 300 KHz yang mengalami beban lingkungan. Tujuan

utama adalah untuk menentukan apakah perbaikan komponen retak, seperti pelat roti lapis yang dibaut atau lubang dibor di ujung retak, efektif dalam menahan propagasi retak. Telah direkomendasikan untuk menggabungkan emisi akustik dengan jenis monitoring misalnya, pengukuran regangan. Mengandalkan AE sebagai sumber pertama dari pendeteksian retak tidak terbukti layak di kota New York. Setelah lokasi retak diketahui, AE dapat memonitor aktivitas mereka. Salah satu kesulitan utama dalam aplikasi metode ini adalah ketidakmampuan lalu lintas kendaraan untuk menghasilkan respon yang berarti dari struktur.

Monitoring gelombang suara frekuensi rendah, seperti yang dihasilkan oleh rem kawat telah menjadi praktek standar untuk menyelidiki suspensi dan kabel stay.

#### 2. Transducers Akustik Elektromagnetik

Teknologi pengukuran regangan menggunakan transduser akustik elektromagnetik yang menghasilkan dan mendeteksi frekuensi tinggi gelombang tegangan dalam baja menggunakan medan elektromagnetik. Sistem ini dapat mengukur regangan pada elemen baja dengan mendeteksi perubahan waktu tempuh gelombang tegangan. Keuntungan dari sistem ini adalah bahwa itu menempel magnetis kepada elemen baja (sangat sedikit persiapan permukaan yang diperlukan) dan

pengukuran tegangan dinamis dapat cepat diambil.

### Sistem Pencitraan Termografi Inframerah

Termografi Inframerah (TI) merupakan metode optik non-kontak, yang memanfaatkan perbedaan perpindahan panas melalui suatu struktur untuk mengungkapkan lokasi dari cacat yang tersembunyi. Jenis tipikal dari cacat yang dapat ditempatkan menggunakan TI termasuk rongga di grouting dinding batu, delaminasi dalam pelat beton, dan kelembaban yang berlebihan di dinding & insulasi atap. Termografi Inframerah digunakan untuk evaluasi lantai jembatan termasuk deteksi dan kuantifikasi delaminasi. Namun, Termografi inframerah dibatasi oleh kondisi lingkungan dan memiliki kesulitan mengevaluasi lantai dengan lapisan aspal. Termografi inframerah dual band menggunakan dua panjang gelombang inframerah yang berbeda secara bersamaan mengatasi beberapa masalah operasional (variasi permukaan yang terutama pancaran) ditemui dengan Termografi inframerah standar.

Salah satu metode yang dipilih untuk pemeriksaan jembatan adalah termografi aktif atau sementara. Metode ini berbeda dengan metode konvensional termografi dalam pemanfaatan tergantung waktu

pemanasan (atau pendinginan) dari target. Tergantung pada jenis karakteristik cacat dan panas dari target, sebuah pemanasan atau pendinginan eksternal diterapkan dalam bentuk denyut energi singkat. Gangguan panas yang diciptakan ini kemudian diikuti dengan perbedaan waktu-diselesaikan dengan analisis citra inframerah.

Pelapisan cacat, seperti pelepuhan dan bintik-bintik korosi bawah permukaan, atau korosi yang berlebihan dari elemen baja dapat dideteksi dalam gambar inframerah sebagai akibat dari perbedaan dalam difusivitas panas dari daerah yang rusak dan tidak rusak. Kenaikan suhu dari permukaan yang dipanaskan diatur oleh jumlah energi yang disimpan dan kecepatan aplikasi, dikombinasikan dengan sifat panas dari permukaan material. Berkenaan dalam mendeteksi cacat, jumlah kontras yang diamati baik di permukaan adalah fungsi dari dimensi yang cacat dan kedalaman dari permukaan diamati, kenaikan suhu awal dan sifat panas material.

Fenomena fisik di balik inspeksi inframerah aktif dapat divisualisasikan dengan mengikuti perambatan dan deteksi dari gangguan panas yang terinduksi. Sebuah panas yang terinduksi “muka gelombang” bisa dibayangkan mengalir dari permukaan terbuka ke dalam material. Untuk bahan bebas cacat, homogen,

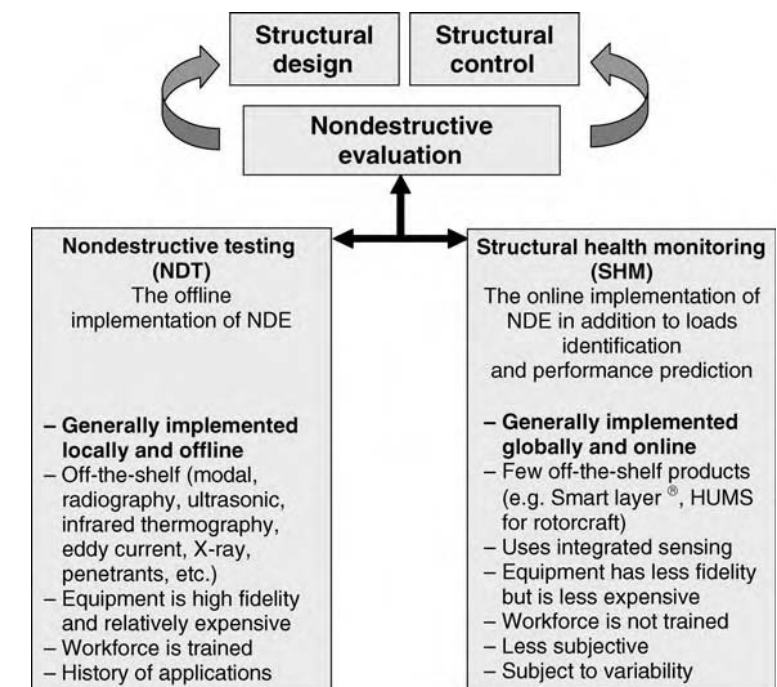
“muka gelombang” dari panas melewati secara seragam. Namun, di mana ada cacat, seperti delaminasi atau retak (diisi dengan udara atau oksida), ini membuat impedansi panas lebih tinggi terhadap bagian dari “muka gelombang.” Secara fisik, ketika cacat yang dekat ke permukaan, mereka membatasi laju pendinginan karena adanya isolasi menghalangi pengaruh, dan dengan demikian menghasilkan “titik panas.” Ketika permukaan ini dipandang oleh citra panas, suhu selisih yang timbul dari adanya cacat itu menjadi jelas terlihat lama setelah pengendapan dari denyut panas.

Peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan termografi aktif jatuh ke wilayah yang terpisah belakangnya: sumber pemanas dan sistem pencitraan / analisis termal. Sumber pemanasan yang biasa yang digunakan berdenyut lampu kuarsa. Analisis termografi dapat juga dilakukan dengan mendinginkan target bukannya pemanasan. Sistem pencitraan analisis termal / biasanya meliputi IR termografi terintegrasi dengan PC berbasis akuisisi citra dan pengolahan perangkat keras. Hardware tambahan dapat termasuk perekam video, printer warna dan layar monitor. ■

## Bab 4

## Penutup

S HMS dan NDT (pemeriksaan khusus) ini saling melengkapi dimana SHMS dapat mengidentifikasi adanya suatu kerusakan pada elemen tertentu di lokasi tertentu, dan NDT dapat mengidentifikasi secara lokal dengan data pengukuran yang lebih akurat, volume/ dimensi kerusakan yang lebih jelas, orientasi kerusakan, dan lainnya. ■



**Gambar 28** Perbandingan NDT dan SHMS (Adams, Douglas E, *Health monitoring of structural materials and components-methods with applications*, hal 17, 2007)

# Daftar Pustaka

- Adams, Douglas E. 2007. *Health Monitoring of Stuctural Materials and Components-Methods with Applications*. Chichester, West Sussex: john Wiley & Sons.
- Aktan, A.Emin, F. Necati Catbas, Kirk A. Grimmelsman, Mesut Pervizpour. 2003. *Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges*: Drexel Intellgient Infrastructure and Transportation Safety Institute <http://www.di3.drexel.edu/DI3/Events/PaperPresentation/FHWAGuideFull-web.pdf> (diakses tahun 2011).
- Andersen, Jacob E., and Mario Fustinoni. 2006. *Structural Health Monitoring System*. Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S dan Futurtec OY.
- Bergmeister, Konrad. 2002. *Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*. State-of-the-Art Report, Stuttgart: The International Federation for Structural Concrete (fib - fédération internationale du béton) [http://www.jct-monitor.com/Upfiles/Video/201207\\_1503209135.pdf](http://www.jct-monitor.com/Upfiles/Video/201207_1503209135.pdf) (diakses tahun 2012).
- Rücker, W., F. Hille, dan R. Rohrmann. 2006. *F08a: Guideline for Assessment of Existing Structures*. Berlin: SAMCO. [http://www.samco.org/network/download\\_area/ass\\_guide.pdf](http://www.samco.org/network/download_area/ass_guide.pdf) (diakses tahun 2011).
- Rücker, W., F. Hille, dan R. Rohrmann. 2006. *F08b: Guideline for Structural Health Monitoring*. Berlin: SAMCO. [http://www.samco.org/network/download\\_area/mon\\_guide.pdf](http://www.samco.org/network/download_area/mon_guide.pdf) (diakses tahun 2011).
- Wenzel, Helmut. 2009. *Health Monitoring of Bridges*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.



PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN JALAN DAN JEMBATAN  
Badan Penelitian dan Pengembangan  
Kementerian Pekerjaan Umum  
[www.pusjatan.pu.go.id](http://www.pusjatan.pu.go.id)