

Terjemahan Bahasa Indonesia

Kuliah ke-4: Penilaian Risiko dalam Teknik Sipil

Dokumen ini merupakan terjemahan berurutan dari halaman-halaman yang tampak pada gambar yang Anda lampirkan.

Tujuan kuliah ini

Tujuan kuliah ini adalah memperkenalkan kerangka kerja untuk penilaian risiko dalam teknik sipil serta menyediakan berbagai teknik yang mempermudah pelaksanaan berbagai tahapan penilaian risiko. Pertama, disajikan sebuah kerangka penilaian risiko yang bersifat umum terhadap skala analisis maupun bidang penerapan rekayasa. Selanjutnya, diuraikan prosedur, teknik, dan alat untuk penilaian risiko serta berbagai langkah analisis risiko. Berdasarkan kuliah ini, mahasiswa diharapkan memperoleh pengetahuan dan keterampilan mengenai:

- Apa saja isu utama yang harus dipertimbangkan dalam analisis pengambilan keputusan berbasis risiko?
- Bagaimana seorang pengambil keputusan dikarakterisasi?
- Mengapa preferensi penting dalam pengambilan keputusan?
- Bagaimana suatu sistem dikarakterisasi?
- Apa yang dimaksud dengan peristiwa paparan?
- Bagaimana kerentanan suatu sistem rekayasa berkaitan dengan konsekuensi?
- Bagaimana menentukan tingkat detail representasi sistem dalam suatu penilaian risiko?
- Dalam hal apa ketangguhan (robustness) berkaitan dengan konsekuensi langsung dan tidak langsung?
- Bagaimana risiko dapat dikendalikan dan dikelola?
- Dengan cara apa komunikasi risiko dapat mengurangi konsekuensi sosial-ekonomi?
- Apa saja langkah-langkah dalam penilaian risiko?
- Bagaimana paparan, kejadian, dan skenario yang dapat menimbulkan konsekuensi dapat diidentifikasi?
- Alat apa saja yang tersedia untuk menganalisis risiko dan bagaimana cara kerjanya?

4.1 Pendahuluan

Secara tradisional, istilah penilaian risiko dikaitkan dengan kerangka kerja, prosedur, teknik, dan alat yang diperlukan untuk mengelola risiko yang berhubungan dengan suatu kegiatan atau fasilitas rekayasa tertentu. Risiko di sini umumnya dipahami sebagai nilai harapan dari konsekuensi merugikan yang berkaitan dengan semua kemungkinan peristiwa yang dapat dialami oleh kegiatan atau fasilitas tersebut. Sebagaimana diuraikan dalam kuliah tentang analisis keputusan dalam rekayasa, penilaian risiko memegang peranan penting dalam pengambilan keputusan rekayasa karena ukuran risiko masuk langsung ke dalam fungsi utilitas atau, dalam istilah rekayasa yang lebih umum, ke dalam fungsi manfaat. Oleh karena itu, jika dalam risiko juga dipertimbangkan semua keuntungan, yaitu bukan hanya semua kemungkinan peristiwa yang berkaitan dengan konsekuensi negatif tetapi juga semua kemungkinan peristiwa yang berkaitan dengan konsekuensi positif, maka risiko yang dievaluasi dapat digunakan langsung sebagai fungsi manfaat yang menjadi dasar dilakukannya analisis keputusan.

Pada bagian berikut, penilaian risiko pertama-tama akan diperkenalkan dengan mengikuti kerangka penilaian risiko dalam rekayasa yang dikembangkan dalam Joint Committee on Structural Safety (JCSS). Setelah itu, secara singkat diuraikan prosedur penilaian risiko sesuai praktik terbaik saat ini dalam penilaian risiko yang dikodifikasi. Terakhir, diperkenalkan seperangkat teknik dan alat tradisional untuk mendukung penilaian risiko.

4.2 Kerangka JCSS untuk Penilaian Risiko dalam Rekayasa

Pengembangan dan pengelolaan infrastruktur masyarakat merupakan tugas sentral bagi keberlanjutan keberhasilan masyarakat. Proses keputusan yang terlibat dalam tugas ini mencakup seluruh aspek pengelolaan dan pelaksanaan perencanaan, investigasi, perancangan, manufaktur, pelaksanaan, operasi, pemeliharaan, dan dekomisioning objek-objek infrastruktur masyarakat seperti infrastruktur lalu lintas, perumahan, sistem distribusi tenaga, dan sistem distribusi air. Dari sudut pandang masyarakat, tujuan utama dari kegiatan-kegiatan semacam itu adalah meningkatkan kualitas hidup individu-individu dalam masyarakat, baik untuk generasi sekarang maupun generasi mendatang. Dari perspektif proyek individual, tujuannya dapat sesederhana memperoleh pengembalian ekonomi investasi yang maksimal.

Jika seluruh aspek persoalan keputusan dapat diketahui dengan pasti, identifikasi keputusan optimal akan mudah dilakukan melalui analisis biaya-manfaat tradisional. Namun, karena pemahaman terhadap persoalan-persoalan yang terlibat dalam masalah keputusan sering kali jauh dari sempurna, dan karena proses fenomena fisik maupun interaksi manusia hanya dapat dimodelkan dalam istilah yang cukup tidak pasti, maka persoalan keputusan dalam rekayasa tunduk

pada ketidakpastian yang signifikan. Karena itu, hasil keputusan tidak dapat dinilai dalam istilah yang pasti. Tidak ada cara untuk menilai dengan kepastian konsekuensi yang timbul dari keputusan yang dibuat. Akan tetapi, yang dapat dinilai adalah risiko yang terkait dengan berbagai alternatif keputusan. Berdasarkan penilaian risiko, alternatif-alternatif keputusan kemudian dapat diperingkat secara konsisten. Jika konsep risiko sebagai hasil kali sederhana antara probabilitas terjadinya suatu peristiwa yang menimbulkan konsekuensi dan akibat dari peristiwa itu diperluas sehingga juga mencakup aspek manfaat yang diperoleh dari keputusan, maka risiko dapat dihubungkan langsung dengan konsep utilitas dari teori keputusan ekonomi, dan tersedialah kerangka metodologis yang utuh untuk identifikasi keputusan optimal secara konsisten. Kerangka ini dianggap sebagai dasar teoretis bagi pengambilan keputusan berbasis risiko, dan pembahasan berikut berkenaan dengan penerapannya untuk tujuan manajemen risiko dalam rekayasa.

Keputusan dan pengambil keputusan

Suatu keputusan dapat dipahami sebagai alokasi sumber daya yang bersifat mengikat, yang dibuat oleh seorang pengambil keputusan. Pengambil keputusan adalah otoritas atau orang yang memiliki kewenangan atas sumber daya yang dialokasikan serta tanggung jawab atas konsekuensi keputusan terhadap pihak ketiga. Maksud pengambil keputusan adalah mencapai suatu tujuan, yang nilainya bagi pengambil keputusan setidaknya seimbang dengan sumber daya yang dialokasikan oleh keputusan tersebut. Pengambil keputusan dihadapkan pada persoalan memilih di antara sekumpulan alternatif keputusan yang dapat menimbulkan konsekuensi berbeda, baik berupa kerugian maupun manfaat. Tujuan yang hendak dicapai oleh pengambilan keputusan merepresentasikan preferensi pengambil keputusan dalam menimbang berbagai atribut yang dapat dikaitkan dengan kemungkinan konsekuensi dari alternatif keputusan.

Dengan demikian jelas bahwa perumusan persoalan keputusan akan sangat bergantung pada pengambil keputusan. Siapa para pemangku kepentingan, penerima manfaat, dan pihak yang bertanggung jawab? Setiap kemungkinan pengambil keputusan akan memiliki sudut pandang yang berbeda terkait preferensi, atribut, dan tujuan. Penting untuk mengidentifikasi pengambil keputusan karena pemilihan dan pembobotan atribut harus dilakukan atas nama pengambil keputusan tersebut.

Masyarakat sebagai suatu entitas pada umumnya sulit dipahami, dan sebelum membahas pengambilan keputusan sosial yang optimal lebih jauh, perlu dibatasi berbagai kemungkinan interpretasi. Menurut Oxford (2006), "society" dapat didefinisikan sebagai suatu komunitas orang tertentu yang tinggal di suatu negara atau wilayah dan memiliki adat, hukum, serta organisasi yang sama. Definisi ini cukup membantu karena menunjukkan setidaknya tiga karakteristik penting, yaitu keterbatasan geografis, kondisi batas hukum, serta kendala organisasional. Namun demikian, meskipun definisi ini menunjuk pada

masyarakat yang didefinisikan pada tingkat negara-bangsa dan sesuai dengan pemahaman yang paling umum, dalam beberapa hal definisi tersebut kurang memadai dalam terang globalisasi yang terus berlangsung di seluruh dunia. Banyak keputusan yang dahulu dipandang sebagai urusan masing-masing negara kini dianggap sebagai isu kepentingan umum dan penting bagi dunia, misalnya pemanfaatan tenaga nuklir dan emisi CO₂. Dalam praktiknya, pembatasan geografis suatu masyarakat pada satu negara individual dengan demikian pada umumnya tidak diterima. Karena alasan yang sama, masyarakat yang lebih kecil daripada negara juga dapat dipertimbangkan; dalam hal ini isu kepentingan bersama dapat berkaitan dengan perencanaan kota, pengelolaan limbah, dan penyediaan air.

Dari uraian di atas tampak bahwa terdapat himpunan tak berhingga dari berbagai cara yang mungkin untuk mendefinisikan masyarakat. Hal ini menegaskan perlunya mendefinisikan secara lebih jelas pengertian masyarakat sebelum konsep tersebut berguna untuk merumuskan pengambilan keputusan sosial yang optimal.

Untuk tujuan pengambilan keputusan, perlu diidentifikasi atribut tertentu dari "pengambil keputusan". Atribut-atribut ini meliputi preferensi pengambil keputusan, kondisi batas yang diberikan secara eksogen dan harus dipatuhi oleh pengambil keputusan, serta keterbatasan terkait sumber daya. Hanya setelah atribut-atribut tersebut didefinisikan secara lengkap, identifikasi keputusan optimal dapat dilakukan. Oleh karena itu, berguna untuk memandang masyarakat sebagai entitas orang-orang yang di dalamnya preferensi bersama dapat diidentifikasi, kondisi batas eksogen sama, dan sumber daya bersama digunakan. Sebelum pengambilan keputusan sosial yang optimal dapat diupayakan, atribut-atribut ini harus diidentifikasi. Jelas bahwa definisi ini dapat diterapkan pada perserikatan negara, negara individual, maupun komunitas lokal, tergantung konteks pengambilan keputusannya; namun terlihat bahwa batasan geografis tidaklah esensial, walaupun dalam kenyataan sering tersirat dalam atribut-atribut lainnya.

Dalam praktik, suatu masyarakat merupakan entitas yang kompleks, bahkan untuk masyarakat pada tingkat komunitas. Mungkin faktor terpenting dalam pendefinisian suatu masyarakat adalah seperangkat nilai bersama dan landasan moral; inilah yang sebagian besar menentukan preferensi suatu masyarakat. Contoh yang baik adalah piagam hak asasi manusia PBB, yang menjadi batu pijakan penting bagi komunitas dunia, yakni Perserikatan Bangsa-Bangsa. Selain prasyarat ini, fungsi masyarakat dalam kehidupan sehari-hari sering kali menjadi isu utama dalam masyarakat; salah satu faktor utama bagi masyarakat, misalnya komunitas, adalah fungsionalitasnya. Untuk mempertahankan dan meningkatkan fungsi tersebut, pada umumnya perlu diorganisasikan masyarakat sedemikian rupa sehingga tanggung jawab pengelolaan berbagai fungsi dialokasikan kepada unit dan orang organisasi yang berbeda. Kadang-kadang organisasi-organisasi itu diberikan secara eksogen, tetapi dalam beberapa kasus tidak. Dalam kasus

terakhir, menjadi tanggung jawab masyarakat untuk mengidentifikasi organisasi yang paling efisien. Hal yang sama berlaku bagi hukum dan regulasi. Beberapa masyarakat, misalnya pada tingkat komunitas, mungkin memiliki sedikit atau tidak memiliki kemungkinan untuk menetapkan atau mengubah hukum dan regulasi, tetapi harus mematuhi ketentuan yang diberikan secara eksogen tersebut.

Jika negara atau bangsa dipertimbangkan sebagai suatu masyarakat, dari uraian di atas disadari bahwa masyarakat semacam itu dapat terdiri atas struktur hierarkis masyarakat yang didefinisikan pada tingkat yang lebih rendah, seperti kanton, kotamadya, dan komunitas; setiap masyarakat dengan seperangkat atributnya sebagian ditentukan oleh masyarakat pada tingkat yang lebih tinggi. Penting disadari bahwa untuk kegiatan rekayasa yang dilakukan atas nama masyarakat pada tingkat tertinggi, seperti negara atau bangsa, perangkat sosial yang tersedia untuk menjamin pengambilan keputusan optimal dalam praktik terbatas pada struktur organisasi, hukum dan regulasi, perpajakan, dan subsidi. Pada tingkat tertinggi suatu masyarakat, hal-hal tersebut merupakan instrumen yang harus dioptimalkan. Struktur organisasi dapat menentukan ketersediaan sumber daya dan dengan demikian menetapkan kendala penganggaran bagi kegiatan rekayasa. Hukum dan regulasi dapat menetapkan kriteria mengenai risiko yang dapat diterima terhadap manusia dan lingkungan, dan perpajakan serta subsidi dapat diimplementasikan secara strategis untuk mengarahkan perkembangan masa depan menuju keberlanjutan yang lebih besar. Pada tingkat yang lebih rendah, optimasi keputusan rekayasa akan selalu tunduk pada kondisi batas yang diberikan oleh organisasi, hukum, dan regulasi. Pengambilan keputusan rekayasa yang optimal pada tingkat sosial terendah adalah kasus yang biasanya dipertimbangkan dalam literatur tentang pengambilan keputusan rekayasa yang optimal. Optimasi peraturan dan regulasi sebagai sarana mengoptimalkan pengambilan keputusan rekayasa atas nama masyarakat telah dibahas dalam penelitian dan sampai tingkat tertentu juga dalam praktik; sejauh ini hanya sedikit upaya yang diarahkan pada optimasi struktur organisasi masyarakat itu sendiri.

Berikut ini merepresentasikan enam tingkat umum pengambilan keputusan. Namun, spesifikasi lebih lanjut mengenai kemungkinan pengambil keputusan dapat bergantung pada struktur politik negara yang dipertimbangkan:

- Otoritas supranasional
- Otoritas nasional dan/atau badan regulator
- Otoritas lokal
- Pemilik swasta
- Operator swasta
- Pemangku kepentingan tertentu

Atribut hasil keputusan

Keputusan mungkin tidak berhasil memenuhi tujuan; seseorang dapat saja mengalokasikan sumber daya namun, karena berbagai alasan, tidak mencapai tujuannya. Pengambil keputusan mungkin memiliki beberapa tujuan yang saling bertentangan. Derajat pencapaian suatu tujuan diukur dalam bentuk atribut (atau kriteria). Pada dasarnya terdapat tiga jenis atribut: alami, terbangun (constructed), dan proksi. Atribut alami adalah atribut yang memiliki penafsiran umum bagi semua orang, misalnya biaya dalam dolar, jumlah korban jiwa, dan besaran terukur lainnya. Untuk banyak tujuan penting, seperti memperbaiki citra dan meningkatkan prestise internasional, sulit atau bahkan mustahil untuk merumuskan atribut alami. Dalam hal ini, atribut terbangun dapat digunakan; atribut ini tersusun dari deskripsi verbal tentang beberapa tingkat dampak yang berbeda yang secara langsung menunjukkan derajat tercapainya tujuan terkait, dan kepada tingkat-tingkat tersebut diberikan indikator numerik. Contoh atribut terbangun yang kemudian, seiring waktu dan penggunaan, berubah menjadi atribut alami adalah produk nasional bruto GNP (gabungan beberapa faktor untuk menunjukkan aktivitas ekonomi suatu negara), rata-rata industri Dow Jones, dan sebagainya. Akhirnya, ada kasus-kasus ketika sulit mengidentifikasi kedua jenis atribut tersebut bagi suatu tujuan tertentu. Dalam kasus ini, pengukuran tak langsung dapat digunakan. Atribut yang dipakai untuk menunjukkan tingkat ketercapaian tujuan disebut atribut proksi. Ketika suatu atribut digunakan sebagai atribut proksi bagi tujuan yang mendasar, nilai-nilai atribut tersebut hanya dipertimbangkan berdasarkan hubungan yang dipersepsikan terhadap pencapaian tujuan mendasar itu. Pengambil keputusan akan membuat keputusan yang konsisten dengan nilai-nilainya, yaitu hal-hal yang penting baginya, terutama yang relevan terhadap keputusannya. Nilai yang umum adalah nilai ekonomi, yang menurutnya pengambil keputusan akan berusaha meningkatkan kekayaannya. Nilai lain dapat bersifat personal, seperti kebahagiaan atau keamanan, atau sosial, seperti keadilan.

Preferensi antar atribut - utilitas

Setelah himpunan atribut ditentukan, tujuan-tujuan harus dikuantifikasi dengan model nilai/utilitas. Hal ini dilakukan dengan mengubah nilai atribut ke dalam suatu skala nilai melalui penilaian terhadap kekuatan nilai relatif atau kekuatan preferensi. Skala nilai ini sering disebut sebagai fungsi utilitas. Dalam beberapa kasus, mungkin tidak jelas bagaimana secara langsung mentransfer berbagai nilai atribut ke dalam satu skala nilai yang sama. Untuk mengatasi persoalan yang tampak ini, dimungkinkan mempertimbangkan masalah keputusan multiatribut. Namun ditekankan bahwa solusi atas persoalan multiatribut akan mengimplikasikan pembobotan berbagai atribut satu terhadap yang lain, dan dengan demikian transparansi yang lebih besar dalam proses keputusan dicapai dengan membuat pembobotan itu secara langsung.

Masalah nilai multiatribut adalah persoalan trade-off nilai. Trade-off ini dapat distrukturkan secara sistematis dalam fungsi utilitas. Fungsi-fungsi ini adalah fungsi bernilai skalar yang didefinisikan pada ruang konsekuensi, yang berfungsi membandingkan secara tidak langsung berbagai tingkat dari atribut-atribut yang berbeda. Dengan adanya fungsi utilitas, persoalan pengambil keputusan adalah memilih alternatif dari ruang alternatif yang layak yang memaksimalkan utilitas yang diharapkan.

Utilitas yang diharapkan digunakan sebagai ukuran relatif yang memungkinkan pemilihan di antara berbagai tindakan. Tindakan dengan utilitas yang diharapkan paling besar akan dipilih di antara tindakan-tindakan yang mungkin. Dengan demikian, tidak ada kriteria absolut bagi keberterimaan tindakan yang dipertimbangkan yang diberikan oleh teori keputusan.

Kendala dalam pengambilan keputusan

Analisis keputusan pada dasarnya merupakan perbandingan relatif di antara alternatif-alternatif yang telah didefinisikan, yang darinya alternatif terbaik akan direkomendasikan. Namun, hal ini tidak menjamin bahwa risiko dari alternatif terbaik itu dapat diterima, misalnya terhadap keselamatan individu. Untuk menjamin bahwa, misalnya, tingkat keselamatan manusia tidak dilanggar, risiko terkait dapat dihitung dan diperiksa terhadap tingkat maksimum yang ditetapkan. Tingkat-tingkat tersebut harus dipandang sebagai kendala dasar dalam proses pengambilan keputusan.

Kelayakan dan optimalitas

Alternatif keputusan yang berbeda akan mengimplikasikan kerugian potensial dan pendapatan potensial yang berbeda. Representasi risiko dalam bentuk utilitas yang diharapkan mempermudah pengambilan keputusan sesuai dengan preferensi pengambil keputusan menurut teori keputusan. Pada Gambar 4.1 diberikan ilustrasi variasi utilitas, yang diukur dalam bentuk manfaat yang diharapkan dari suatu aktivitas, sebagai fungsi dari berbagai alternatif keputusan.

Gambar 4.1: Ilustrasi variasi utilitas (manfaat yang diharapkan) sebagai fungsi dari berbagai alternatif keputusan.

Keputusan yang tidak menghasilkan manfaat positif jelas tidak boleh dipilih. Secara optimal, keputusan yang menghasilkan utilitas terbesar yang dipilih, tetapi sebagaimana telah diuraikan sebelumnya dapat saja terdapat kendala pada alternatif keputusan yang tidak secara eksplisit tercakup dalam perumusan fungsi utilitas. Dalam hal ini, tidak semua keputusan yang layak harus dapat diterima.

4.3 Pemodelan Sistem

Pengambilan keputusan dapat dipandang setara dengan berpartisipasi dalam suatu permainan, di mana keputusan-keputusan (langkah-langkah) oleh pengambil keputusan bertujuan mengoptimalkan utilitas sesuai dengan preferensi yang diwakilinya. Lawan utama dalam permainan ini adalah alam, tetapi juga individu-individu dalam masyarakat yang, karena kurangnya pengetahuan, kecelakaan, atau niat jahat, dapat menimbulkan kerusakan pada masyarakat dan karena itu harus diperhitungkan. Gambar 4.2 mengilustrasikan pengambilan keputusan berbasis risiko dalam konteks sosial dari perspektif antargenerasi. Dalam setiap generasi, keputusan harus dibuat yang tidak hanya memengaruhi generasi terkait tetapi juga semua generasi berikutnya. Perlu ditekankan bahwa definisi sistem pada prinsipnya harus mencakup inventaris lengkap dari semua konsekuensi yang berpotensi terjadi serta semua skenario peristiwa yang mungkin mengarah pada konsekuensi tersebut.

Pada tingkat intragenerasi, unsur-unsur permainan terdiri dari pengetahuan tentang sistem dan dunia sekitarnya, alternatif keputusan yang tersedia, serta kriteria (preferensi) untuk menilai utilitas yang terkait dengan berbagai alternatif keputusan.

Gambar 4.2: Unsur-unsur utama dalam analisis keputusan berbasis risiko intra-/antargenerasi.

Mengetahui aturan (unsur-unsur) permainan, yakni sistem, batas-batas sistem, kemungkinan konsekuensi bagi sistem, dan bagaimana semua faktor ini saling berhubungan dengan dunia di luar sistem dan ke masa depan, sangat penting untuk memenangkan permainan. Karena alasan ini, bagian yang sangat signifikan dari pengambilan keputusan berbasis risiko dalam praktik berkaitan dengan identifikasi/definisi sistem, serta identifikasi kriteria penerimaan, kemungkinan konsekuensi, dan probabilitas kejadiannya. Bermain dalam permainan dilakukan dengan “membeli” perubahan fisik pada sistem atau “membeli” pengetahuan tentang sistem sehingga hasil permainan dapat dioptimalkan.

Secara umum, suatu sistem dapat dipahami terdiri atas representasi spasial dan temporal dari semua konstituen yang diperlukan untuk menggambarkan keterkaitan antara semua paparan (bahaya) yang relevan dan konsekuensinya. Konsekuensi langsung terkait dengan kerusakan pada konstituen individual dari sistem, sedangkan konsekuensi tidak langsung dipahami sebagai semua konsekuensi di luar konsekuensi langsung.

Representasi sistem dapat dilakukan dalam bentuk konstituen yang saling berhubungan secara logis pada berbagai tingkat detail atau skala dalam waktu dan ruang. Konstituen dapat berupa komponen fisik, proses prosedural, dan aktivitas manusia. Tingkat detail atau skala yang tepat bergantung pada karakteristik fisik atau prosedural maupun karakteristik spasial dan temporal dari konsekuensinya. Isu penting ketika model sistem dikembangkan adalah

bahwa model tersebut memfasilitasi penilaian risiko dan pemeringkatan risiko dari alternatif keputusan yang konsisten dengan pengetahuan yang tersedia tentang sistem, serta memungkinkan risiko diperbarui sesuai dengan pengetahuan yang mungkin tersedia pada masa mendatang. Lebih jauh lagi, representasi sistem harus memasukkan pilihan-pilihan untuk pengambilan keputusan responsif di masa depan yang bergantung pada pengetahuan yang tersedia pada saat itu.

Penting bahwa tingkat detail yang dipilih cukup untuk memfasilitasi deskripsi logis mengenai kejadian dan skenario kejadian yang berkaitan dengan konstituen sistem, yang secara individual dan/atau kombinasi dapat menimbulkan konsekuensi. Selain itu, representasi sistem harus mengakomodasi sejauh mungkin pengumpulan informasi mengenai konstituen-konstituen tersebut. Hal ini memudahkan pembaruan kinerja sistem melalui pengetahuan tentang keadaan konstituen individual sistem.

Pengetahuan dan ketidakpastian

Pengetahuan mengenai konteks keputusan yang dipertimbangkan merupakan faktor keberhasilan utama bagi pengambilan keputusan yang optimal. Dalam pengambilan keputusan dunia nyata, kekurangan pengetahuan (atau ketidakpastian) merupakan situasi yang normal, sehingga perlu dapat merepresentasikan dan menangani ketidakpastian ini secara konsisten. Statistik Bayesian menyediakan dasar bagi representasi ketidakpastian yang konsisten, terlepas dari sumbernya, dan dengan mudah memfasilitasi pertimbangan bersama atas ketidakpastian yang dinilai secara murni subjektif, ketidakpastian yang dinilai secara analitis, dan bukti yang diperoleh dari observasi.

Dalam konteks pengambilan keputusan sosial dengan horizon waktu yang jauh melampaui proyek individual atau masa jabatan pengambil keputusan individual, ketidakpastian yang terkait dengan asumsi-asumsi sistem sangatlah penting. Berbagai asumsi dapat diajukan sehubungan dengan perubahan iklim masa depan, perkembangan ekonomi, dampak jangka panjang polusi, dan sebagainya. Jelas bahwa jika asumsi yang dibuat salah, keputusan yang diambil juga akan salah.

Dalam proses pengambilan keputusan berbasis risiko, ketika karena kurangnya pengetahuan beberapa representasi sistem yang berbeda bisa sama-sama valid, hal tersebut harus diperhitungkan. Keputusan yang robust dapat diidentifikasi apabila, meskipun mungkin terdapat beberapa sistem yang berbeda, keputusan tersebut tetap menghasilkan utilitas atau manfaat maksimum sesuai dengan preferensi yang diwakili oleh pengambil keputusan.

Ketidakpastian terkait kinerja suatu sistem tertentu, atau terkait keberadaan satu sistem dibanding sistem lain, merupakan faktor yang sangat memengaruhi pengambilan keputusan, dan perlu memasukkan ketidakpastian tersebut secara konsisten ke dalam proses pengambilan keputusan.

Sebagaimana diuraikan dalam Kuliah 2, terdapat banyak proposisi untuk mengkarakterisasi berbagai jenis ketidakpastian. Sudah menjadi standar untuk membedakan ketidakpastian akibat variabilitas alami, ketidakpastian model, dan ketidakpastian statistik. Jenis pertama ini sering disebut sebagai ketidakpastian aleatori (atau Tipe 1), sedangkan dua jenis terakhir disebut sebagai ketidakpastian epistemik (atau Tipe 2). Namun, perbedaan ini diperkenalkan untuk tujuan memusatkan perhatian pada bagaimana ketidakpastian dapat dikurangi, bukan untuk menuntut perlakuan yang berbeda dalam analisis keputusan. Pada kenyataannya, perbedaan antara ketidakpastian aleatori dan epistemik bergantung pada model sistem yang didefinisikan.

Kontribusi relatif dari kedua komponen ketidakpastian tersebut bergantung pada skala spasial dan temporal yang diterapkan dalam model. Untuk analisis keputusan, perbedaan tersebut tidak relevan; analisis keputusan formal mengharuskan semua ketidakpastian dipertimbangkan dan diperlakukan dengan cara yang sama.

Representasi sistem

Penilaian risiko dari suatu sistem tertentu dipermudah dengan mempertimbangkan representasi umum yang diilustrasikan pada Gambar 4.3.

Gambar 4.3: Representasi umum sistem dalam penilaian risiko.

Paparan terhadap sistem direpresentasikan sebagai berbagai peristiwa paparan yang bekerja pada konstituen sistem. Konstituen sistem dapat dipandang sebagai garis pertahanan pertama terhadap paparan. Pada Gambar 4.4 diberikan ilustrasi mengenai bagaimana konsekuensi dapat dianggap berkembang di dalam sistem yang dipertimbangkan.

Kerusakan pada sistem yang disebabkan oleh kegagalan konstituen dianggap berkaitan dengan konsekuensi langsung. Konsekuensi langsung dapat mencakup berbagai atribut sistem, seperti kerugian moneter, hilangnya nyawa, kerusakan terhadap kualitas lingkungan, atau sekadar perubahan karakteristik konstituen. Berdasarkan kombinasi peristiwa kegagalan konstituen dan konsekuensi yang bersesuaian, dapat timbul konsekuensi lanjutan. Konsekuensi lanjutan dapat disebabkan misalnya oleh jumlah kerugian moneter yang terkait dengan kegagalan konstituen, serta perubahan fisik sistem secara keseluruhan yang disebabkan oleh efek gabungan kegagalan konstituen. Namun, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4, suatu konsekuensi lanjutan yang penting sehubungan dengan peristiwa-peristiwa yang menarik perhatian media dapat dikaitkan dengan kerugian sosial-ekonomi yang sangat besar. Kerugian semacam itu dapat terjadi karena tekanan politik untuk bereaksi terhadap bencana atau kecelakaan berat, yang bertentangan dengan keputusan optimal, atau bahkan sebelum dasar keputusan sempat ditetapkan sama sekali. Konsekuensi lanjutan dalam penilaian risiko sistem memainkan peran besar, dan pemodelannya perlu diberi penekanan besar pula.

Gambar 4.4: Ilustrasi evolusi konsekuensi menjadi konsekuensi langsung maupun tidak langsung.

Perlu dicatat bahwa setiap konstituen dalam suatu sistem dapat dimodelkan sebagai sebuah sistem tersendiri. Suatu sistem dapat berupa jaringan jalan dengan konstituen misalnya jembatan, lihat Gambar 4.5. Jembatan itu sendiri pada gilirannya juga dapat menjadi sistem dengan konstituen berupa elemen-elemen struktural. Bergantung pada tingkat detail dalam penilaian risiko, yaitu definisi sistem, maka paparan, konstituen, dan konsekuensinya akan berbeda.

Kerentanan (vulnerability) dikaitkan dengan risiko yang berhubungan dengan konsekuensi langsung, sedangkan ketangguhan (robustness) dikaitkan dengan derajat peningkatan risiko total melampaui konsekuensi langsung. Ketiga karakteristik sistem ini, yang akan didefinisikan pada bagian berikutnya, hanya bermakna bila dikaitkan dengan definisi sistem sebagaimana telah diuraikan sebelumnya.

Terjemahan Bahasa Indonesia

Risk Assessment in Civil Engineering — lanjutan halaman 4.11–4.20

Dokumen ini merupakan terjemahan berurutan dari gambar yang dilampirkan pengguna. Tata letak rumus disederhanakan ke bentuk teks agar tetap mudah dibaca dalam PDF.

Gambar 4.5: Karakterisasi sistem generik pada skala yang berbeda dalam hal paparan, kerentanan, dan robustness.

Paparan dan bahaya

Paparan terhadap suatu sistem didefinisikan sebagai semua pengaruh endogen maupun eksogen yang mungkin menimbulkan konsekuensi bagi sistem yang ditinjau. Karakterisasi probabilistik dari paparan suatu sistem memerlukan model probabilistik gabungan untuk semua pengaruh yang relevan terhadap waktu dan ruang.

Kerentanan

Kerentanan suatu sistem berkaitan dengan konsekuensi langsung yang disebabkan oleh kerusakan pada unsur-unsur penyusun sistem untuk suatu kejadian paparan tertentu. Kerusakan pada unsur-unsur penyusun sistem merepresentasikan keadaan kerusakan sistem. Dalam istilah risiko, kerentanan suatu sistem didefinisikan melalui risiko yang terkait dengan seluruh kemungkinan konsekuensi langsung, yang diintegrasikan atau dijumlahkan untuk seluruh kejadian paparan yang mungkin terjadi.

Robustness

Robustness suatu sistem berkaitan dengan kemampuan sistem yang ditinjau untuk mempertahankan keadaan kerusakan tertentu di bawah kondisi paparan yang berlaku, sehingga konsekuensi dari kejadian paparan dapat dibatasi hanya pada konsekuensi langsung. Penting dicatat bahwa konsekuensi tidak langsung suatu sistem tidak hanya bergantung pada keadaan kerusakan, tetapi juga pada paparan terhadap sistem yang rusak tersebut. Karena itu, ketika robustness suatu sistem dinilai, probabilitas konsekuensi tidak langsung perlu dinilai sebagai nilai harapan atas semua keadaan kerusakan dan kejadian paparan yang mungkin. Robustness kondisional dapat didefinisikan melalui robustness bersyarat pada suatu paparan atau keadaan kerusakan tertentu.

4.4 Penilaian risiko

Dalam berbagai bidang penerapan penilaian risiko, telah dikembangkan beragam metodologi yang cukup spesifik. Akibatnya, penilaian risiko lintas batas bidang aplikasi menjadi sulit dibandingkan dan bahkan lebih sulit lagi diintegrasikan. Banyak skema prosedural untuk pengambilan keputusan berbasis risiko tersedia, tetapi fokusnya lebih pada alur proyek penilaian risiko daripada kerangka penilaian risiko itu sendiri. Selain itu, salah satu kelemahan utama dari kerangka penilaian risiko yang ada adalah bahwa kerangka tersebut belum dikembangkan dari sudut

pandang Bayesian, yakni belum cukup memfasilitasi dan meningkatkan potensi pemanfaatan evidence dan/atau indikasi evidence dalam penilaian risiko. Oleh sebab itu, kerangka penilaian risiko generik seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.6 diusulkan. Kerangka ini memfasilitasi pendekatan Bayesian untuk penilaian risiko dan pemanfaatan penuh indikator risiko.

Pada Gambar 4.6, sistem yang dinilai diasumsikan terpapar kejadian-kejadian berbahaya (paparan EX_k) dengan karakterisasi probabilistik $p(EX_k)$, $k = 1, n_EXP$, dengan n_EXP menyatakan jumlah paparan. Secara umum, kejadian paparan seharusnya tidak dipahami sebagai kejadian tunggal seperti beban salju, gempa bumi, atau banjir, melainkan sebagai efek dari kombinasi relevan di antara hal-hal tersebut. Probabilitas konsekuensi langsung $c_D(C_{ij})$ yang terkait dengan keadaan ke- j C_{ij} dari unsur sistem ke- i akibat paparan pada unsur tersebut dinyatakan dengan $p(C_{ij} | EX_k)$, dan risiko kondisional yang terkait adalah $p(C_{ij} | EX_k) c_D(C_{ij})$. Penjumlahan dan integrasi risiko kondisional tersebut masing-masing atas seluruh unsur dan keadaan sistem dinyatakan sebagai kerentanan sistem terhadap paparan yang dipertimbangkan. Risiko akibat konsekuensi langsung dinilai melalui nilai harapan kerentanan sistem atas seluruh n_EXP kejadian paparan yang mungkin sebagai berikut:

$$R_D = \sum[k=1..n_EXP] p(C_{ij} | EX_k) \cdot c_D(C_{ij}) \cdot p(EX_k) \quad (4.1)$$

Selanjutnya, probabilitas konsekuensi tidak langsung $c_ID(S_l, c_D(C))$ yang terkait dengan keadaan sistem S_l akibat paparan EX_k , keadaan unsur-unsur C , serta konsekuensi langsung terkait $c_D(C)$, dinyatakan dengan $p(S_l | EX_k)$, dan risiko kondisional yang bersesuaian adalah $p(S_l | EX_k) c_ID(S_l, c_D(C))$. Integrasi risiko tidak langsung kondisional atas seluruh keadaan sistem yang mungkin dapat dipandang sebagai ukuran robustness, yang menunjukkan kemampuan sistem untuk membatasi konsekuensi total hanya sampai konsekuensi langsung pada keadaan unsur dan paparan tertentu. Risiko akibat konsekuensi tidak langsung dinilai melalui nilai harapan konsekuensi tidak langsung terhadap semua paparan dan keadaan unsur yang mungkin, sebagai berikut:

$$R_ID = \sum[k=1..n_EXP] \sum[l=1..n_STA] p(S_l | EX_k) \cdot c_ID(S_l, c_D(C)) \cdot p(EX_k) \quad (4.2)$$

Gambar 4.6: Kerangka penilaian risiko generik berbasis indikator yang diusulkan.

Robustness suatu sistem dapat dikuantifikasi dengan indeks robustness I_R yang dinyatakan melalui perbandingan antara risiko langsung dan risiko total, yaitu:

$$I_R = R_D / (R_ID + R_D) \quad (4.3)$$

Indeks ini memungkinkan pemeringkatan keputusan berdasarkan pengaruhnya terhadap robustness.

Dalam uraian di atas, belum ada acuan waktu yang secara eksplisit dikaitkan dengan probabilitas dan, sebagai konsekuensinya, juga dengan risiko. Spesifikasi yang jelas mengenai hal ini tentu diperlukan karena akan memengaruhi pengambilan keputusan, penilaian keberterimaan risiko, pemodelan umum ketidakpastian, serta penilaian probabilitas.

Dalam beberapa bidang penilaian risiko, praktik yang umum adalah bekerja dengan laju kejadian peristiwa pemicu konsekuensi, bukan misalnya probabilitas tahunan. Namun, pertimbangan di atas dapat diterapkan secara langsung pula pada bidang tersebut dengan mempertimbangkan secara eksplisit bukan hanya kejadian tunggal dalam satu tahun tertentu, tetapi seluruh kejadian yang mungkin termasuk kejadian berulang dalam satu tahun yang sama.

Perlu disadari bahwa penilaian risiko yang diusulkan dapat diterapkan pada tingkat skala apa pun untuk suatu sistem. Kerangka ini dapat diterapkan pada komponen, subsistem, maupun sistem secara keseluruhan; dengan demikian, kerangka ini juga memfasilitasi pendekatan hierarkis terhadap penilaian risiko. Definisi sistem dalam konteks ini menjadi sangat penting dalam definisi paparan, kerentanan, dan robustness. Kerangka penilaian risiko ini memungkinkan pemanfaatan berbagai indikator yang dapat dikuantifikasi terkait paparan, kerentanan, dan robustness dari sistem yang ditinjau. Karena struktur hierarkis penilaian risiko dalam bentuk kejadian kondisional, kerangka ini sangat didukung oleh alat penilaian risiko modern seperti Bayesian Probabilistic Nets dan Influence Diagrams.

Indikator risiko

Indikator risiko dapat dipahami sebagai setiap karakteristik sistem atau unsur-unsurnya yang dapat diamati atau diukur dan yang memuat informasi tentang risiko. Jika representasi sistem telah dilakukan dengan tepat, maka secara umum indikator risiko akan tersedia baik untuk paparan terhadap sistem, kerentanan sistem, maupun robustness sistem; lihat Gambar 4.7.

Dalam kerangka Bayesian untuk pengambilan keputusan berbasis risiko, indikator semacam itu memainkan peranan penting. Jika penilaian risiko dilakukan pada struktur pemikul beban, maka indikator risiko dapat berupa setiap besaran teramati yang dapat dikaitkan dengan pembebanan struktur (paparan), kekuatan komponen-komponen struktur (kerentanan), serta redundansi, daktilitas, efektivitas pengendalian kondisi, dan pemeliharaan (robustness).

Gambar 4.7: Karakteristik fisik, indikator risiko, dan konsekuensi dalam representasi sistem.

Persepsi risiko

Bergantung pada situasi yang dihadapi, para pengambil keputusan dapat merasa kurang nyaman dengan penerapan langsung expected utility sebagai dasar pemeringkatan keputusan, terutama karena dua alasan: pengambil keputusan bisa jadi tidak yakin terhadap penilaian utilitas, atau tidak yakin terhadap penilaian probabilitas yang dinilai berkaitan dengan kinerja sistem dan unsur-unsurnya.

Hal ini pada dasarnya berarti tidak mengetahui aturan permainan, dan dapat dipandang sebagai alasan utama munculnya penerapan prinsip kehati-hatian (precautionary principle). Pada prinsipnya, efek dari salah menilai utilitas yang terkait dengan suatu luaran tertentu setara dengan salah menilai probabilitas bahwa luaran tersebut akan terjadi; artinya, kemungkinan luaran yang berkaitan dengan utilitas marjinal dapat dinilai secara keliru. Ini pada gilirannya dapat menyebabkan expected utility diestimasi terlalu tinggi ataupun terlalu rendah, yang kemudian

dapat menghasilkan keputusan yang berbeda. Agar dapat membuat keputusan yang konservatif, pengambil keputusan cenderung bersikap risk averse, yaitu memberi bobot lebih besar dalam pengambilan keputusan pada kejadian-kejadian langka namun berkonsekuensi tinggi (biasanya kejadian yang pengetahuan dan pengalamannya terbatas) dibandingkan kejadian yang lebih sering tetapi berkonsekuensi lebih rendah (yang pengetahuan dan pengalamannya mungkin lebih luas).

Hal ini selanjutnya dapat mengarah pada keputusan yang bias untuk tidak melakukan aktivitas yang sebenarnya dapat menguntungkan masyarakat. Dari sudut pandang sosial, dan dengan asumsi bahwa semua luaran yang relevan serta semua ketidakpastian telah dimasukkan ke dalam formulasi fungsi utilitas, perilaku ini pada dasarnya tidak rasional dan juga tidak tepat bila dikaitkan dengan pengambilan keputusan yang menyangkut penyelamatan jiwa. Akan tetapi, yang sangat penting adalah bahwa persepsi publik serta konsekuensi sosial terkait bila terjadi peristiwa merugikan harus secara eksplisit diperhitungkan sebagai konsekuensi lanjutan (follow-up consequence) dalam formulasi fungsi utilitas; lihat pula Gambar 4.5.

Idealnya, publik diberi informasi mengenai pengambilan keputusan berbasis risiko sampai pada tingkat di mana setiap individu akan bertindak sebagai pengambil keputusan yang rasional, yakni tidak bereaksi berlebihan ketika terjadi peristiwa merugikan. Dalam kondisi demikian, perilaku risk averse akan berkurang. Situasi ideal seperti ini mungkin tidak realistis untuk sepenuhnya dicapai, namun tetap dapat dipertimbangkan sebagai salah satu cara penanganan risiko dalam pengambilan keputusan berbasis risiko.

Merupakan tanggung jawab politik agar keputusan-keputusan sosial didasarkan pada penilaian menyeluruh atas risiko dan manfaat, termasuk seluruh ketidakpastian yang memengaruhi masalah keputusan. Namun, dalam beberapa kasus, karena perbedaan asumsi pemodelan, para ahli yang berbeda dapat mengidentifikasi keputusan optimal yang berbeda pula untuk masalah keputusan yang sama. Tantangannya kemudian adalah bagaimana menggunakan informasi semacam itu sebagai dukungan bagi pengambilan keputusan sosial.

Perbandingan alternatif keputusan

Dasar untuk menyusun urutan preferensi berbagai alternatif keputusan adalah risiko terkait atau, secara lebih umum, expected utilities yang bersesuaian $E[U(a_j)]$, $j = 1, 2, \dots, n_a$:

$$E[U(a_j)] = \sum_{i=1..n_{oj}} p(O_i | a_j) \cdot u(a_j, O_i) \quad (4.4)$$

di mana $E[\cdot]$ adalah operator ekspektasi, n_{oj} adalah jumlah kemungkinan luaran O_i yang terkait dengan alternatif a_j , $p(O_i | a_j)$ adalah probabilitas bahwa masing-masing luaran tersebut akan terjadi (dengan syarat a_j), dan $u(a_j, O_i)$ adalah utilitas yang terkait dengan pasangan (a_j, O_i) . Penyajian ini mengasumsikan himpunan luaran yang diskret, tetapi secara langsung dapat digeneralisasi ke ruang sampel kontinu. Dengan mempertimbangkan pemodelan konsekuensi, termasuk perhatian khusus pada konsekuensi tidak langsung, Persamaan (4.5) dapat ditulis ulang sebagai:

$$E[U(a_j)] = \sum p(C_{ij} | EX_k, a_j) c_D(C_{ij}, a_j) p(EX_k, a_j) + \sum \sum p(S_l | EX_k, a_j) c_{ID}(S_l, c_D(C), a_j)$$

Pada prinsipnya, formulasi expected benefit ini kini dapat dengan mudah dimanfaatkan dalam kerangka analitis keputusan untuk mengidentifikasi alternatif keputusan yang optimal. Pada kuliah sebelumnya, analisis keputusan prior, posterior, dan pre-posterior telah diperkenalkan untuk tujuan dukungan keputusan dalam rekayasa.

Kriteria dan keberterimaan risiko

Secara umum diterima bahwa keputusan yang berkaitan dengan perencanaan, perancangan, pelaksanaan, operasi, dan penghentian operasi infrastruktur masyarakat seharusnya didasarkan pada optimisasi manfaat sepanjang daur hidup dengan menggunakan prinsip-prinsip penilaian risiko sebagaimana diuraikan sebelumnya.

Namun, selain risiko akibat kerugian ekonomi, pengambil keputusan juga harus memperhitungkan risiko kematian dan cedera serta potensi kerusakan lingkungan; lihat pula Gambar 4.2.

Berbagai format untuk menerapkan kriteria keberterimaan risiko tersedia dalam literatur. Gambaran umum mengenai hal ini diberikan pada Kuliah 13.

Diskonto dan keberlanjutan

Pendiskontoan investasi, termasuk untuk manajemen risiko, dapat memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap pengambilan keputusan. Terutama dalam konteks perencanaan infrastruktur masyarakat yang diharapkan memiliki umur layanan relatif panjang dan untuk mana biaya pemeliharaan serta penghentian operasi juga harus diperhitungkan, asumsi mengenai diskonto menjadi sangat penting.

Untuk horizon waktu 20 sampai 100 tahun, yaitu melampaui beberapa generasi, tingkat diskonto seharusnya didasarkan pada nilai rata-rata jangka panjang, bebas dari pajak dan inflasi. Di sektor swasta, tingkat bunga riil jangka panjang kira-kira sama dengan tingkat pengembalian yang diharapkan dari suatu investasi. Di sektor publik, tingkat diskonto — termasuk dalam konteks investasi penyelamatan jiwa — semestinya bersesuaian dengan laju pertumbuhan ekonomi riil per kapita. Hal ini sepadan dengan laju peningkatan kekayaan rata-rata anggota masyarakat dari waktu ke waktu.

Penanganan risiko

Berbagai kemungkinan untuk mengumpulkan informasi tambahan mengenai ketidakpastian yang berkaitan dengan pemahaman terhadap kinerja sistem, serta untuk mengubah karakteristik sistem, biasanya dikaitkan dengan opsi penanganan risiko; dalam konteks pengambilan keputusan berbasis risiko, hal-hal ini dapat dipandang sebagai alternatif keputusan yang tersedia. Penanganan risiko diputuskan untuk mengoptimalkan expected utility yang hendak dicapai oleh proses pengambilan keputusan.

Mengikuti kerangka penilaian risiko yang diusulkan sebelumnya, penanganan risiko dapat diterapkan pada berbagai tingkatan dalam representasi sistem, yakni terkait

paparan, kerentanan, dan robustness; lihat Gambar 4.8. Dalam penilaian risiko pada struktur pemikul beban, penanganan risiko melalui peningkatan pengetahuan dapat dilakukan dengan mengumpulkan informasi mengenai karakteristik statistik pembebanan (paparan), karakteristik kekuatan masing-masing komponen struktur (kerentanan), dan reliabilitas sistem struktur (robustness).

Penanganan risiko melalui perubahan karakteristik sistem dapat dicapai dengan membatasi penggunaan struktur (paparan), memperkuat komponen-komponen struktur (kerentanan), dan meningkatkan redundansi sistem struktur (robustness).

Gambar 4.8: Ilustrasi bagaimana penanganan risiko dapat dilakukan pada berbagai tingkat representasi sistem.

Transfer risiko

Transfer risiko dapat dipandang sebagai salah satu bentuk khusus penanganan risiko. Pengambil keputusan yang bertanggung jawab atas pengelolaan risiko dapat mengoptimalkan pengambilan keputusannya untuk tujuan mengurangi risiko dan/atau memaksimalkan manfaat sebagaimana telah diuraikan. Akan tetapi, sebagaimana telah ditekankan sebelumnya, hasil pengambilan keputusan pada umumnya terkait dengan ketidakpastian. Bagi pengambil keputusan dengan kemampuan ekonomi terbatas, ketidakpastian ini dapat menjadi masalah dalam arti bahwa kerugian dapat timbul akibat keputusan yang diambil meskipun secara nilai harapan keputusan tersebut optimal. Kerugian semacam itu dapat melebihi kapasitas ekonomi pengambil keputusan, sehingga menjadi isu sentral untuk memperhitungkan kendala anggaran secara langsung dalam pengambilan keputusan. Konsekuensi dari peristiwa semacam itu dapat dimasukkan ke dalam formulasi masalah keputusan dengan menggunakan konsep konsekuensi lanjutan yang telah diuraikan sebelumnya. Namun demikian, risiko yang terkait dengan peristiwa kerugian ekonomi yang berlebihan juga dapat dikelola dengan mentransfer risiko tersebut kepada pihak ketiga. Transfer risiko seperti ini umumnya harus “dibeli”, dan inilah konsep yang lazim dianut dalam industri asuransi dan reasuransi.

Komunikasi risiko

Komunikasi risiko, sama halnya dengan transfer risiko, dapat dipandang sebagai salah satu cara khusus untuk menangani risiko. Individu-individu yang berbeda, dan kelompok individu yang berbeda dalam masyarakat, mempersepsikan risiko secara berbeda, bergantung pada situasi mereka sendiri: sejauh mana mereka mungkin terkena paparan, sejauh mana mereka mampu memengaruhi risiko, dan sejauh mana risiko tersebut bersifat sukarela. Secara umum, risiko dipersepsikan lebih negatif ketika para pemangku kepentingan merasa lebih terekspos, merasa tidak memiliki pengaruh, dan merasa bahwa risiko tersebut tidak bersifat sukarela.

Aspek lain terkait dengan bagaimana kejadian merugikan dipersepsikan oleh individu dan kelompok dalam masyarakat, baik ketika maupun setelah kejadian tersebut berlangsung. Hal ini kembali bergantung pada perspektif individu dan kelompok yang terdampak. Selain itu, terjadinya peristiwa merugikan serta cara informasi mengenai peristiwa tersebut disediakan akan memengaruhi persepsi risiko secara umum, bahkan dalam banyak kasus memicu tindakan yang tidak memiliki dasar rasional dan

hanya menambah konsekuensi sosial dari peristiwa tersebut. Se jauh mungkin, perilaku seperti ini perlu dimasukkan dalam penilaian konsekuensi sebagai konsekuensi lanjutan.

Akibat pengaruh persepsi risiko, umumnya diamati bahwa individu dan kelompok yang berbeda memiliki sikap yang berbeda mengenai risiko apa yang dapat diterima; lebih jauh lagi, sikap ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik peristiwa merugikan yang terkait. Sikap risk averse dan risk prone dapat diamati, yang pada dasarnya mengacu pada fakta bahwa risiko “diberi selera” yang berbeda bergantung pada karakteristik tersebut. Meskipun perilaku seperti ini merupakan urusan pribadi bagi masing-masing individu, dalam konteks pengambilan keputusan sosial perilaku ini menghasilkan distribusi risiko yang tidak merata, dan dari perspektif itu jelas tidak etis serta juga tidak rasional.

Persepsi terhadap risiko dapat dipengaruhi secara signifikan oleh informasi mengenai risiko itu sendiri. Penyediaan informasi yang transparan tentang sifat paparan, tindakan pencegahan yang mungkin dilakukan, cara risiko dikelola, dan konsekuensi sosial dari perilaku yang tidak rasional dapat mengurangi ketidakpastian yang terkait dengan pemahaman individu atas risiko. Hal ini pada gilirannya mendorong perilaku rasional dan dengan demikian mengurangi konsekuensi lanjutan. Oleh sebab itu, skema penyampaian informasi yang terarah, transparan, dan objektif kepada para pemangku kepentingan merupakan sarana penanganan risiko yang sangat berharga.

4.5 Prosedur Penilaian Risiko

Aspek-aspek individual dari penilaian risiko sebagaimana diuraikan pada Bagian 4.4 dapat dipahami bersifat generik dalam arti berlaku untuk setiap jenis fasilitas atau aktivitas rekayasa. Pada Gambar 4.9, sebuah bagan alir untuk prosedur penilaian risiko ditampilkan. Dapat dilihat bahwa aspek-aspek penilaian risiko yang dibahas pada Bagian 4.4 akan dialokasikan ke dalam berbagai kotak aktivitas pada bagan alir tersebut. Kotak “pendefinisian konteks” berkaitan dengan identifikasi pengambil keputusan, batasan-batasan pengambilan keputusan, serta pemahaman dan representasi menyeluruh dari preferensi pengambil keputusan. Kotak “definisi sistem” berkaitan dengan representasi sistem. Isu utamanya di sini adalah mengidentifikasi paparan dan konsekuensi mana (langsung maupun tidak langsung) yang akan dimasukkan dalam penilaian risiko. Kotak “identifikasi skenario bahaya” menyangkut pemahaman dan pemodelan hubungan kausal atau logis antara kejadian-kejadian yang, dimulai dari suatu kejadian paparan, dapat mengarah pada konsekuensi langsung maupun tidak langsung.

Dalam kotak “analisis probabilitas” dan “analisis konsekuensi”, komponen-komponen yang diperlukan untuk mengkuantifikasi risiko dianalisis, yakni probabilitas kejadian pemicu konsekuensi dan konsekuensi yang bersesuaian. Oleh karena itu, langkah ini dalam penilaian risiko kadang-kadang juga disebut sebagai analisis risiko. Langkah yang merujuk pada “identifikasi skenario risiko” berkaitan dengan pemeringkatan berbagai skenario bahaya sesuai dengan tingkat risikonya. Hal ini memudahkan pemusatan analisis lanjutan pada skenario bahaya yang mendominasi risiko. Kotak “analisis sensitivitas” mengacu pada evaluasi apakah diperlukan penyempurnaan

pemodelan skenario. Biasanya aktivitas ini diarahkan pada evaluasi signifikansi asumsi-asumsi yang dibuat dalam proses representasi sistem. Jika hasil mengenai risiko terkuantifikasi sangat sensitif terhadap asumsi pemodelan, maka biasanya diperlukan penyempurnaan representasi sistem.

Pada aktivitas yang disebut “menilai risiko”, risiko-risiko yang telah diquantifikasi secara tradisional dibandingkan dengan kriteria keberterimaan risiko. Jika risiko dapat diterima, pada prinsipnya tidak diperlukan tindakan lebih lanjut. Namun, tetap perlu diselidiki apakah terdapat opsi yang dapat menghasilkan pemenuhan preferensi pengambil keputusan yang lebih baik. Sebaliknya, jika kriteria keberterimaan risiko tidak terpenuhi, maka perlu dilakukan analisis terhadap berbagai opsi penanganan risiko. Aktivitas ini pada gambar disebut sebagai “penanganan risiko”.

Gambar 4.9: Representasi generik alur pengambilan keputusan berbasis risiko (kode Australia-Selandia Baru 4369 (1995)).

Analisis risiko, sebagaimana dapat dipahami, dapat dilakukan pada berbagai tingkat kedetilan. Oleh sebab itu, untuk tujuan komunikasi hasil analisis risiko, penting bahwa tingkat kedetilan yang digunakan dalam analisis dinyatakan bersama hasil analisis tersebut. Jika tidak, pengambil keputusan yang mendasarkan keputusannya pada hasil analisis risiko tidak memiliki sarana untuk menilai kualitas dasar keputusan tersebut. Secara umum dapat dinyatakan bahwa analisis keputusan seharusnya dilakukan pada tingkat kedetilan yang memfasilitasi pemeringkatan yang konsisten dari berbagai opsi manajemen risiko yang tersedia sesuai manfaat harapan yang terkait. Dengan cara yang sama, penilaian risiko juga harus dilakukan pada tingkat kedetilan yang konsisten dengan tingkat kedetilan yang mendasari kemungkinan kriteria keberterimaan risiko yang digunakan.

Dalam aplikasi industri, hanya sedikit konsensus yang tersedia mengenai klasifikasi penilaian risiko. Namun, dalam industri nuklir, kategorisasi berikut telah disepakati untuk apa yang disebut analisis risiko probabilistik (PRA) atau analisis keselamatan probabilistik (PSA).

- Tingkat 1: Analisis probabilitas terjadinya peristiwa kritis tertentu pada pembangkit listrik tenaga nuklir.
- Tingkat 2: Analisis probabilitas terjadinya dan konsekuensi dari peristiwa kritis tertentu pada pembangkit listrik tenaga nuklir.
- Tingkat 3: Sama seperti Tingkat 2, tetapi selain itu juga memasukkan pengaruh manusia serta hilangnya nyawa manusia apabila hal tersebut terjadi.

Apakah klasifikasi ini juga berguna untuk bidang aplikasi lain dapat didiskusikan, tetapi gagasan untuk mengklasifikasikan tingkat-tingkat analisis risiko bagaimanapun juga merupakan gagasan yang bermanfaat.

4.6 Teknik untuk Identifikasi Sistem

Identifikasi paparan, kejadian, dan skenario yang berpotensi menimbulkan konsekuensi harus mempertimbangkan semua kemungkinan konsekuensi merugikan bagi:

- Personel
- Lingkungan
- Ekonomi.

Tujuan ini memang sulit sepenuhnya dicapai dalam praktik, tetapi harus diupayakan sejauh mungkin sesuai dengan seluruh pengetahuan yang ada. Oleh karena itu, identifikasi skenario pada hakikatnya berkaitan dengan memastikan bahwa semua pengetahuan yang ada telah diidentifikasi dan diperhitungkan.

Suatu skenario biasanya dipahami sebagai satu kejadian atau rangkaian kejadian yang mengarah pada konsekuensi bagi suatu fasilitas atau aktivitas rekayasa yang ditinjau. Sebagaimana diuraikan pada Bagian 4.4, kegagalan dapat merepresentasikan beragam kejadian, seperti runtuhnya struktur bangunan, banjir pada lokasi konstruksi, atau ledakan di dalam terowongan. Pada Gambar 4.10–4.13, sejumlah jenis “kegagalan” yang berbeda ditunjukkan.

Terjemahan Bahasa Indonesia

Risk Assessment in Civil Engineering - bagian lanjutan dari gambar yang dilampirkan

Dokumen ini menerjemahkan isi gambar secara berurutan untuk halaman sumber yang terlihat pada lampiran: 4.22, 4.23, 4.25, 4.27, 4.28, 4.29, dan 4.30.

Catatan: halaman 4.24 dan 4.26 tidak tampak pada lampiran yang saya terima, sehingga tidak dimasukkan ke dalam PDF ini.

Halaman sumber 4.22

Gambar 4.13: Runtuhnya jembatan akibat perilaku dinamis yang tidak terduga pada kondisi angin tertentu, Tacoma Narrows, Amerika Serikat.

Kesamaan dari situasi yang diperlihatkan pada Gambar 4.10-4.13 adalah bahwa peristiwa kegagalan terjadi sebagai akibat dari paparan yang tidak diperkirakan sebelumnya dan urutan kejadian yang juga tidak diperkirakan, yang potensi konsekuensinya belum sepenuhnya dipahami.

Berbagai teknik untuk mengidentifikasi skenario telah berkembang dari beragam bidang penerapan rekayasa, seperti industri kimia, industri tenaga nuklir, dan industri aeronautika. Di antaranya adalah sebagai berikut:

Halaman sumber 4.23

- Analisis Bahaya Pendahuluan (Preliminary Hazard Analysis - PHA).
- Analisis Mode Kegagalan dan Dampaknya (Failure Mode and Effect Analysis - FMEA).
- Analisis Mode Kegagalan, Dampak, dan Kekritisan (Failure Mode Effect and Criticality Analysis - FMECA).
- Studi Bahaya dan Operabilitas (Hazard and Operability Studies - HAZOP).
- Penyaringan Risiko (sesi HAZID).

Selain itu, skenario juga dapat diidentifikasi berdasarkan pengalaman masa lalu sebagaimana dilaporkan dalam bank data insiden yang memuat dokumentasi sistematis mengenai kejadian yang menyebabkan, atau hampir menyebabkan (near misses), peristiwa kegagalan sistem.

Walaupun tidak satu pun dari metode tersebut dikembangkan secara khusus untuk analisis risiko di sektor teknik sipil, banyak penerapannya telah terbukti bermanfaat juga pada bidang ini.

Berikut ini akan diberikan uraian singkat mengenai teknik-teknik klasik (PHA, FMEA, FMECA, dan HAZOP) berdasarkan Stewart dan Melchers (1997), kemudian metodologi penyaringan risiko yang memuat aspek dari semua teknik klasik tersebut akan dijelaskan. Pada akhirnya, akan dibahas pula isu identifikasi bahaya pada bidang penerapan teknik sipil.

Analisis Bahaya Pendahuluan - PHA

Analisis bahaya pendahuluan biasanya dilakukan secara kualitatif pada tahap konseptual suatu proyek dengan tujuan mengidentifikasi bahaya-bahaya utama pada sistem dan/atau aktivitas rekayasa yang ditinjau, beserta penyebabnya dan tingkat keparahan konsekuensinya. Namun demikian, PHA juga dapat digunakan sebagai dasar untuk penilaian ulang risiko dan keandalan sistem rekayasa yang sudah digunakan.

Hasil PHA sering dirangkum dalam bentuk tabel yang memuat daftar berikut:

- elemen-elemen berbahaya;
- peristiwa yang dapat memicu situasi berbahaya;
- spesifikasi situasi berbahaya;
- skenario kejadian yang mengarah pada kegagalan sebagai akibat dari situasi berbahaya;
- spesifikasi kegagalan;
- spesifikasi konsekuensi dari kegagalan;
- langkah-langkah penanganan risiko.

Karena sifat PHA yang kualitatif, subsistem dan komponen biasanya tidak diperingkatkan berdasarkan tingkat kekritisannya. Namun, hasil PHA menyediakan dasar untuk melakukan pemeringkatan tersebut dengan menggunakan metode lain seperti FMEA, FMECA, dan HAZOP.

Analisis Mode Kegagalan dan Dampaknya - FMEA

FMEA pada awalnya dikembangkan dalam industri aeronautika dan kini, bersama FMECA sebagaimana diuraikan kemudian, membentuk kerangka utama untuk identifikasi bahaya dalam berbagai bidang penerapan.

Halaman sumber 4.25

Studi Bahaya dan Operabilitas - HAZOP

Metodologi HAZOP pada dasarnya merupakan adaptasi dari FMEA untuk penerapan dalam industri proses yang mempertimbangkan aliran pada pipa dan unit proses. Akan tetapi, prinsip-prinsip HAZOP dapat dengan mudah diterapkan juga pada banyak bidang lain.

HAZOP didasarkan pada penilaian untuk setiap elemen sistem yang ditinjau terhadap kemungkinan masalah atau penyimpangan yang dapat mengganggu fungsi sistem. Hasil HAZOP dirangkum dalam tabel yang memuat daftar untuk setiap elemen yang ditinjau, yaitu:

- deskripsi penyimpangan;
- penyebab penyimpangan;
- konsekuensi penyimpangan;
- tindakan untuk mengurangi probabilitas dan konsekuensi penyimpangan.

Dalam mengisi daftar tersebut, digunakan kata panduan baku seperti NO/NOT, MORE OF, LESS OF, OTHER THAN, AS WELL AS, PART OF, dan REVERSE. Jelas bahwa istilah-istilah ini berasal dari industri proses, tetapi jika ditafsirkan secara abstrak dapat pula diadaptasi untuk bidang penerapan lain.

Sesi Penyaringan Risiko - HAZID

Penyaringan risiko atau sesi HAZID banyak diterapkan, terutama dalam bidang rekayasa lepas pantai, misalnya pada fasilitas produksi yang mencakup sangat banyak fungsi, subsistem, dan komponen.

Penyaringan risiko dilakukan secara dominan kualitatif dengan tujuan utama memperoleh gambaran awal mengenai karakteristik penting dari sistem yang ditinjau. Tujuan sentralnya adalah mengidentifikasi unsur-unsur penyusun sistem, yaitu subsistem dan komponen, yang jelas tidak memerlukan penilaian kuantitatif lebih lanjut, sehingga penilaian lanjutan dapat dibatasi dan difokuskan pada isu-isu risiko yang penting.

Sesi ini dilaksanakan dalam bentuk pertemuan dengan partisipasi semua kategori personel yang terlibat pada suatu tahap dan/atau fungsi tertentu dari sistem rekayasa yang ditinjau. Jika analisis risiko dilakukan untuk struktur jembatan, kategori personel yang relevan misalnya meliputi insinyur perancang, personel inspeksi dan pemeliharaan, ahli material, insinyur geoteknik, pihak dari pemilik dan/atau organisasi pengoperasi, serta orang-orang yang berpengalaman dalam analisis risiko dan keandalan.

Sebelum pertemuan, sistem yang ditinjau diidentifikasi bersama subsistem dan komponennya serta dijelaskan fungsi dan batas-batasnya. Selain itu, harus dinyatakan secara jelas jenis konsekuensi yang menjadi fokus pertemuan (personel, lingkungan, dan ekonomi). Lebih lanjut, penting untuk menelusuri basis data insiden yang relevan guna memperoleh informasi mengenai kegagalan dan hampir gagal pada sistem, subsistem, dan komponen serupa di masa lalu. Informasi ini dibagikan kepada para peserta sebelum pertemuan sebagai dasar persiapan.

Halaman sumber 4.27

- Kecelakaan kapal yang mengakibatkan tumpahan lepas pantai lebih dari 500 ton (TANKER), Bertrand dan Escoffier (1987).

Identifikasi Paparan dan Skenario Kejadian dalam Penerapan Teknik Sipil

Pada prinsipnya, semua pendekatan yang telah dijelaskan sebelumnya dapat diterapkan untuk mengidentifikasi paparan, kejadian, dan skenario pada penerapan teknik sipil, walaupun pendekatan tersebut awalnya dikembangkan untuk bidang penerapan lain. Namun, selalu penting untuk memiliki gambaran umum dan pemahaman tertentu mengenai kerangka masalah yang mendasari sistem atau aktivitas rekayasa yang ditinjau; karena itu akan diberikan pembahasan mengenai kekhususan bahaya dan identifikasinya dalam bidang teknik sipil.

Kerangka persoalan ini dapat diilustrasikan melalui suatu proyek yang melibatkan struktur beton. Dalam contoh ini, perhatian khusus tertuju pada kinerja struktur beton, dan pada Gambar 4.14 diidentifikasi berbagai faktor yang memengaruhi kinerja tersebut.

Dari Gambar 4.14 terlihat bahwa umur suatu struktur pada kenyataannya telah dimulai sejak tahap kontrak dan dipengaruhi oleh sejumlah faktor sepanjang tahap perancangan, tahap konstruksi, tahap operasi, hingga akhirnya struktur tersebut tidak lagi digunakan dan dinonaktifkan. Faktor-faktor tersebut pada gilirannya dapat menimbulkan implikasi merugikan terhadap keselamatan personel, lingkungan, dan biaya selama umur layanan struktur. Keadaan-keadaan ketika implikasi merugikan itu terjadi merupakan bahaya atau skenario bahaya.

Gambar 4.14: Ilustrasi bagaimana berbagai faktor selama tahapan yang berbeda dari suatu struktur beton dapat memengaruhi kinerja struktur.

Dalam proses mengidentifikasi paparan dan skenario yang dapat menimbulkan konsekuensi yang terkait dengan suatu aktivitas atau sistem teknik sipil, akan berguna jika berpikir dalam kerangka penunjuk bahaya, yaitu:

- kronologi kejadian yang terlibat;

- asal pengaruh (alami atau buatan manusia);
- fungsi komponen dan keberhasilan aktivitas.

Halaman sumber 4.28

- kerusakan dan deteriorasi;
- skenario kejadian - ketergantungan kausal dari kejadian merugikan;
- potensi energi;
- material yang digunakan;
- sistem baru dan aktivitas baru;
- pengalaman personel yang terlibat;
- antarmuka dengan sistem atau aktivitas lain;
- kondisi batas;
- pengalaman dari kejadian pada sistem dan aktivitas serupa;
- kategori konsekuensi (kehilangan nyawa, kerusakan lingkungan, dan biaya).

Dari berbagai sudut pandang tersebut, kita mencoba membayangkan bagaimana segala sesuatu dapat berjalan salah. Dalam proses ini berguna untuk berpikir dalam bentuk skenario, yaitu urutan kejadian yang dapat mengarah pada situasi yang merugikan.

Sebagai contoh, pertimbangkan platform lepas pantai yang digambarkan pada Gambar 4.15.

Gambar 4.15: Sketsa utama suatu fasilitas produksi lepas pantai.

Jika hanya mempertimbangkan fase produksi normal, beberapa penunjuk untuk kejadian paparan diberikan pada Tabel 4.2 bersama dengan beberapa paparan, kejadian, dan kategori konsekuensi yang bersesuaian.

Daftar dalam Tabel 4.2 sama sekali tidak lengkap dan hanya dimaksudkan sebagai ilustrasi mengenai bagaimana berbagai penunjuk bahaya dapat diterapkan dalam identifikasi bahaya. Dari Tabel 4.2 terlihat bahwa beberapa penunjuk bahaya mengarah pada identifikasi paparan dan skenario yang sama. Hal ini cukup wajar dan justru memudahkan penilaian menyeluruh serta redundan terhadap potensi bahaya.

Halaman sumber 4.29

Penunjuk bahaya	Paparan	Kejadian / skenario	Konsekuensi
Asal pengaruh - alami	Gelombang ekstrem	Hantaman gelombang pada geladak	Personel; lingkungan; ekonomi
Asal pengaruh - alami	-	Struktur terbalik	Personel; lingkungan; ekonomi
Asal pengaruh - alami	Kerusakan lelah	Kehilangan elemen pengaku	Ekonomi
Asal pengaruh - alami	Kerusakan lelah dan gelombang ekstrem	Kehilangan elemen pengaku dan keruntuhan	Personel; lingkungan; ekonomi
Buatan manusia	Tabrakan kapal	Runtuh	Personel; lingkungan; ekonomi
Buatan manusia	Tabrakan kapal	Kerusakan	Ekonomi
Buatan manusia	Penyalan / kebakaran terbuka	terbakar	Personel; lingkungan; ekonomi

Penunjuk bahaya	Paparan	Kejadian / skenario	Konsekuensi
Potensi energi	Kebocoran bejana bertekanan	Penyalaaan dan ledakan	Personel; lingkungan; ekonomi
Fungsionalitas	Kegagalan riser	Penyalaaan dan ledakan	Personel; lingkungan; ekonomi
Fungsionalitas	Kegagalan riser	Tumpahan minyak dan gas	Lingkungan; ekonomi

Tabel 4.2: Daftar penunjuk paparan, paparan, kejadian dan skenario kejadian, serta kategori konsekuensi.

4.7 Alat untuk Analisis Risiko

Setelah berbagai sumber risiko untuk suatu sistem dan/atau aktivitas rekayasa diidentifikasi, serta dianalisis menurut komponen kronologis dan kausalnya, pohon logika dapat dirumuskan dan digunakan untuk analisis lebih lanjut terhadap risiko keseluruhan maupun untuk menilai kontribusi risiko dari komponen individual.

Dalam bab ini akan dibahas aspek-aspek dasar dari beberapa jenis pohon logika yang paling umum digunakan, yaitu fault tree, event tree, diagram sebab-konsekuensi, dan decision tree. Pada bab berikutnya akan diperkenalkan konsep baru Bayesian Probabilistic Nets, dan akan diperlihatkan bagaimana konsep tersebut dapat secara efisien menggantikan metode-metode yang lebih tradisional.

Fault tree dan event tree sejauh ini merupakan jenis pohon logika yang paling dikenal dan paling luas diterapkan, baik dalam analisis risiko kualitatif maupun kuantitatif. Dua studi risiko paling penting yang menggunakan analisis fault tree dan event tree adalah studi keselamatan nuklir Amerika Serikat dan studi Canvey di Britania Raya mengenai industri proses kimia. Walaupun teknik analisis risiko yang lebih modern seperti Bayesian Probabilistic Nets telah berkembang selama beberapa tahun terakhir, ...

Halaman sumber 4.30

... fault tree dan event tree masih tetap menjadi metode utama yang direkomendasikan untuk studi keselamatan nuklir di Amerika Serikat.

Fault tree dan event tree dalam banyak hal serupa, dan pilihan untuk menggunakan salah satunya atau kombinasi keduanya pada praktiknya lebih bergantung pada tradisi dan preferensi dalam suatu industri tertentu daripada pada karakteristik khusus dari pohon logika itu sendiri.

Perbedaan penting di antara kedua jenis pohon tersebut adalah bahwa fault tree didasarkan pada logika deduktif (melihat ke belakang), sedangkan event tree bersifat induktif (melihat ke depan). Dalam aplikasi praktis, kombinasi fault tree dan event tree biasanya digunakan, di mana bagian fault tree dari analisis berfokus pada representasi urutan kegagalan yang dapat menimbulkan kejadian berkonsekuensi, sedangkan bagian event tree dari analisis berfokus pada representasi evolusi lanjutan dari kejadian pemicu konsekuensi tersebut.

Titik perpotongan antara fault tree dan event tree pada kenyataannya merupakan persoalan preferensi dari insinyur yang melakukan studi. Teknik event tree kecil/fault tree besar maupun event tree besar/fault tree kecil dapat diterapkan pada masalah yang sama untuk saling melengkapi dan memberikan wawasan tambahan mengenai kinerja sistem yang ditinjau.

Diagram sebab-konsekuensi memuat ciri-ciri penting dari fault tree dan event tree, dan pada prinsipnya merupakan kombinasi dari keduanya.

Decision tree sering dipandang sebagai jenis khusus dari event tree, tetapi sebenarnya dapat dilihat dalam perspektif yang jauh lebih luas; jika diterapkan secara konsisten dalam kerangka teori keputusan, decision tree menyediakan landasan teoritis bagi analisis risiko.

Analisis rinci terhadap berbagai jenis pohon logika mensyaratkan bahwa kinerja komponen individual dalam pohon tersebut telah dinilai lebih dahulu dalam hal laju kegagalan dan/atau probabilitas kegagalan, suatu topik yang tidak akan dibahas secara rinci dalam bab ini.

Analisis Fault Tree

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, fault tree didasarkan pada logika deduktif yang dimulai dengan mempertimbangkan suatu peristiwa kegagalan sistem, lalu berupaya menurunkan urutan kausal kegagalan komponen yang dapat menyebabkan kegagalan sistem tersebut. Oleh karena itu, kegagalan sistem sering disebut sebagai top event.

Keterkaitan logis dari urutan kegagalan komponen direpresentasikan melalui sambungan logika (logical gates), dan fault tree pada dasarnya membentuk struktur seperti pohon dengan top event berada di bagian atas dan basic events pada ujung-ujungnya. Basic events adalah peristiwa-peristiwa yang data laju kegagalan atau probabilitasnya tersedia dan tidak dapat diuraikan lebih lanjut.

Kadang-kadang basic events dibedakan menjadi initiating events (atau triggering events) dan enabling events, di mana initiating events selalu merupakan peristiwa pertama dalam urutan kejadian. Enabling events adalah peristiwa yang dapat meningkatkan tingkat keparahan kegagalan yang telah dipicu.

Fault tree adalah diagram logika Boolean yang terutama tersusun atas gerbang AND dan OR. Peristiwa keluaran dari gerbang AND hanya terjadi apabila semua peristiwa masukannya terjadi secara bersamaan, sedangkan peristiwa keluaran dari gerbang OR terjadi apabila salah satu peristiwa masukan terjadi. Pada gambar berikutnya (yang dirujuk dalam teks sumber sebagai Gambar 4.16), berbagai simbol umum untuk gerbang AND dan OR ditunjukkan.

Terjemahan Bahasa Indonesia

Risk Assessment in Civil Engineering - bagian lanjutan dari gambar yang dilampirkan

Dokumen ini menerjemahkan isi gambar secara berurutan untuk halaman sumber yang terlihat pada lampiran: 4.31-4.36.

Halaman sumber 4.31

Gambar 4.16: Ilustrasi simbol-simbol yang umum digunakan untuk gerbang AND dan OR.

Beberapa jenis gerbang logika lain juga ada, misalnya DELAY, MATRIX, QUANTIFICATION, dan COMPARISON; namun, semuanya tidak akan diuraikan dalam teks ini.

Top event dan basic event juga memiliki simbol-simbol khusus sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.17.

Gambar 4.17: Simbol-simbol yang umum digunakan dalam representasi fault tree.

Pada Gambar 4.17, simbol berbentuk belah ketupat merepresentasikan suatu skenario yang belum dikembangkan, yaitu skenario yang belum diuraikan menjadi suatu sistem sub-kejadian karena keterbatasan informasi dan data. Contoh suatu fault tree ditunjukkan pada Gambar 4.18.

Halaman sumber 4.32

Gambar 4.18: Bentuk utama suatu fault tree.

Perlu dicatat bahwa fault tree yang memuat gerbang AND merepresentasikan suatu sistem paralel, yaitu semua komponen harus gagal agar sistem gagal. Dengan demikian, sistem seperti itu merepresentasikan suatu tingkat redundansi tertentu karena sistem masih tetap berfungsi setelah satu komponen gagal.

Sebaliknya, fault tree yang memuat gerbang OR merepresentasikan suatu sistem seri, yaitu sistem tanpa redundansi dalam arti sistem gagal segera setelah salah satu komponennya gagal. Sistem seperti itu juga sering disebut sebagai weakest component system. Sistem juga dapat direpresentasikan secara alternatif dengan diagram blok keandalan, lihat Gambar 4.19.

Gambar 4.19: Diagram blok keandalan untuk gerbang OR dan AND.

Sesuai dengan aturan teori probabilitas, probabilitas kejadian untuk gerbang AND dievaluasi dengan:

$$P = \prod p_i$$

dan untuk gerbang OR dengan:

$$P = 1 - \prod (1 - p_i)$$

Halaman sumber 4.33

di mana n adalah jumlah kejadian masukan ke gerbang, p_i adalah probabilitas kegagalan dari kejadian-kejadian masukan, dan diasumsikan bahwa kejadian-kejadian masukan tersebut saling independen.

Mode kegagalan sistem didefinisikan oleh apa yang disebut cut-sets, yaitu kombinasi basic event yang dengan pasti akan mengarah pada top event. Jumlah kombinasi semacam itu dapat cukup

besar - beberapa ratus untuk suatu pohon logika dengan sekitar 50 basic event.

Penting untuk dicatat bahwa top event masih dapat terjadi walaupun tidak semua basic event dalam suatu cut set terjadi. Minimal cut set adalah cut set yang merepresentasikan kombinasi basic event terkecil yang mengarah ke top event, kadang disebut critical path. Top event hanya akan terjadi jika semua kejadian dalam minimal cut set terjadi. Aspek penting dalam analisis fault tree adalah identifikasi minimal cut set karena hal ini sangat memudahkan evaluasi numerik yang terlibat.

Contoh 4.1 - Sistem catu daya

Suatu sistem catu daya terdiri atas sebuah mesin, pasokan bahan bakar utama untuk mesin tersebut, dan kabel listrik yang mendistribusikan daya kepada konsumen. Selain itu, sebagai cadangan dukungan bahan bakar dipasang suatu dukungan bahan bakar cadangan dengan kapasitas terbatas. Sistem catu daya gagal apabila konsumen terputus dari pasokan daya.

Hal ini pada gilirannya akan terjadi apabila kabel pasokan daya gagal atau mesin berhenti, yang selanjutnya diasumsikan hanya akan terjadi jika pasokan bahan bakar ke mesin gagal.

Suatu model sistem fault tree untuk catu daya ditunjukkan pada Gambar 4.20 bersama dengan probabilitas basic event.

Gambar 4.20: Ilustrasi suatu fault tree untuk sistem catu daya.

Dengan menggunakan aturan kalkulus probabilitas, probabilitas kegagalan mesin P_{mf} adalah sebagai berikut (gerbang AND):

Halaman sumber 4.34

$$P_{mf} = 0.01 \cdot 0.01 = 0.0001$$

Dengan cara yang sama, probabilitas hilangnya dukungan daya P_{mf} adalah sebagai berikut (gerbang OR):

$$P_{mf} = 0.0001 + 0.01 - 0.0001 \cdot 0.01 = 0.0101$$

Event Trees

Event tree adalah representasi urutan logis kejadian yang mengarah pada suatu kondisi tertentu yang menjadi perhatian untuk sistem yang ditinjau, yang umumnya merupakan kondisi merugikan. Perlu dicatat bahwa beberapa keadaan berbeda dari sistem yang ditinjau dapat terkait dengan konsekuensi penting.

Berbeda dengan fault tree, event tree dimulai dari suatu basic initiating event dan berkembang dari titik itu seiring waktu sampai semua keadaan yang mungkin dengan konsekuensi merugikan tercapai. Initiating event biasanya dapat muncul sebagai top event dari analisis fault tree.

Event tree dibangun dari definisi kejadian dan simpul logis (outcomes of events), yang dapat memiliki ruang sampel diskret maupun ruang sampel kontinu. Representasi grafis khas dari event tree ditunjukkan pada Gambar 4.21.

Gambar 4.21: Ilustrasi tampilan utama suatu event tree.

Event tree dapat menjadi cukup kompleks untuk dianalisis. Hal ini mudah dipahami dengan mencatat bahwa untuk suatu sistem dengan n komponen dua-keadaan, jumlah total jalurnya adalah 2^n . Jika tiap komponen memiliki m keadaan, jumlah total cabangnya adalah m^n .

Contoh 4.2 - pengujian tak merusak pada struktur beton

Event tree pada Gambar 4.22 memodelkan skenario kejadian yang berkaitan dengan pengujian tak merusak pada suatu struktur beton. Korosi pada tulangan mungkin ada, dan metode inspeksi yang diterapkan mungkin mendeteksi atau tidak mendeteksi korosi, baik ketika korosi memang ada maupun ketika korosi tidak ada.

Halaman sumber 4.35

Gambar 4.22: Ilustrasi event tree untuk pemodelan inspeksi suatu struktur beton bertulang.

Pada Gambar 4.22, kejadian CI menyatakan bahwa korosi ada, dan kejadian I menyatakan bahwa korosi ditemukan melalui inspeksi. Garis di atas kejadian menyatakan kejadian komplemennya. Berdasarkan event tree seperti itu, misalnya probabilitas bahwa korosi ada jika korosi ditemukan melalui inspeksi dapat dievaluasi.

Dalam banyak kasus, event tree dapat direduksi secara signifikan setelah beberapa evaluasi pendahuluan. Hal ini misalnya terjadi ketika dapat ditunjukkan bahwa probabilitas percabangan menjadi dapat diabaikan. Hal ini sering dimanfaatkan ketika event tree digunakan dalam kaitannya dengan perencanaan inspeksi dan pemeliharaan.

Dalam kasus seperti itu, cabang yang berkaitan dengan peristiwa kegagalan setelah kejadian perbaikan sering kali dapat dihilangkan, setidaknya untuk sistem dengan komponen yang sangat andal.

Pada Gambar 4.23 diperlihatkan suatu fault tree dan event tree gabungan yang menunjukkan bagaimana fault tree sering kali menjadi pemodelan initiating event untuk event tree.

Gambar 4.23: Ilustrasi fault tree dan event tree gabungan.

Diagram Sebab-Konsekuensi

Diagram sebab-konsekuensi pada dasarnya merupakan representasi lain dari fault tree dan event tree gabungan, dalam arti bahwa keterkaitan antara fault tree dan event tree, yaitu top event untuk fault tree (atau initiating event untuk event tree), direpresentasikan ...

Halaman sumber 4.36

... oleh sebuah gerbang persegi panjang dengan kejadian keluaran berupa YA atau TIDAK, yang masing-masing akan mengarah pada konsekuensi yang berbeda. Keuntungan diagram sebab-konsekuensi adalah bahwa fault tree tidak perlu diperluas dalam representasi tersebut, sehingga sangat meningkatkan gambaran umum dari analisis risiko.

Contoh suatu gerbang dalam diagram sebab-konsekuensi ditunjukkan pada Gambar 4.24.

Gambar 4.24: Gerbang dalam diagram sebab-konsekuensi.