

Terjemahan Lengkap ke Bahasa Indonesia

Kuliah 13 - Risk Acceptance and Life Safety in Decision Making

Dokumen ini merupakan terjemahan berurutan berdasarkan seluruh gambar yang Anda lampirkan, dari halaman 13.1 sampai 13.24. Persamaan dipertahankan dalam bentuk sederhana agar tetap mudah dibaca, sementara judul, isi paragraf, keterangan gambar, dan keterangan tabel diterjemahkan ke dalam bahasa Indonesia.

Catatan: label kecil di dalam gambar asli tidak semuanya diterjemahkan ulang sebagai grafis, tetapi seluruh isi pokok, penjelasan, caption, tabel, dan persamaan yang terlihat telah dialihkan ke Bahasa Indonesia secara runtut.

Urutan sumber: halaman 13.1

Kuliah ke-13: Penerimaan Risiko dan Keselamatan Jiwa dalam Pengambilan Keputusan

Tujuan kuliah ini

Kuliah ini membahas prioritas berbagai kemungkinan investasi sosial untuk tujuan menyelamatkan nyawa manusia. Permasalahan ini menyentuh landasan moral dasar masyarakat, sehingga penyelesaiannya menuntut agar nilai-nilai fundamental yang menjadi dasar kehidupan bermasyarakat benar-benar diperhitungkan.

Pertama, dibahas persoalan nilai-nilai dasar masyarakat menurut Piagam PBB tentang Hak Asasi Manusia. Setelah itu dibahas preferensi, khususnya kemungkinan adanya perbedaan antara preferensi individu dan preferensi masyarakat. Dari sini ditekankan bahwa dalam pengambilan keputusan teknik diperlukan sudut pandang normatif dalam menangani preferensi dan keputusan.

Selanjutnya diperkenalkan format-format umum untuk menyajikan hasil penilaian risiko dan untuk memverifikasi apakah suatu risiko dapat diterima. Dijelaskan bahwa dasar dari format-format tradisional tersebut sering bertumpu pada pengalaman serta penilaian pakar, dan umumnya belum memiliki landasan filosofi yang konsisten serta berlaku umum.

Kemudian dibahas risiko kehidupan sebagaimana dialami manusia, serta risiko yang terkait dengan berbagai aktivitas rekayasa dan bisnis teknik. Ditekankan bahwa risiko yang pernah dialami di masa lalu belum tentu mencerminkan penanganan risiko sosial secara terarah. Dari titik tolak ini diperkenalkan konsep baru yang disebut *Life Quality Index* (LQI). Berdasarkan konsep ini ditunjukkan bagaimana kriteria penerimaan risiko keselamatan jiwa dapat diturunkan, dan bagaimana biaya kompensasi dapat dimasukkan ke dalam optimasi alternatif keputusan.

Terakhir, diuraikan beberapa gagasan mutakhir tentang bagaimana menurunkan keputusan yang berkelanjutan dalam rekayasa, serta bagaimana fungsi utilitas dapat dirumuskan dan diterapkan untuk mendukung keputusan sosial-ekonomi yang berkelanjutan.

Berdasarkan materi yang diperkenalkan dalam kuliah ini, mahasiswa diharapkan memperoleh pengetahuan dan keterampilan mengenai hal-hal berikut:

- Apa nilai-nilai dasar masyarakat dalam memprioritaskan penyelamatan nyawa?
- Apa implikasi Piagam PBB tentang Hak Asasi Manusia bagi pengambilan keputusan teknik?
- Bagaimana preferensi pribadi dan preferensi masyarakat dapat berbeda, dan bagaimana hal itu diperhitungkan dalam pengambilan keputusan teknik?
- Apa format tradisional untuk penerimaan risiko dan apa kelemahannya?

- Apa yang dapat dipelajari dari penilaian statistik atas risiko berdasarkan pengalaman masa lalu?
- Apa itu LQI dan konstanta demografis apa saja yang memengaruhinya?
- Bagaimana kriteria *Societal Willingness To Pay* (SWTP) berhubungan dengan LQI?
- Bagaimana kriteria SWTP berkaitan dengan penilaian probabilitas kegagalan struktur yang dapat diterima?
- Bagaimana biaya kompensasi dapat dinilai dan dimasukkan ke dalam optimasi keputusan?

Urutan sumber: halaman 13.2

13.1 Pendahuluan

Dalam bab-bab sebelumnya, aspek-aspek mendasar risiko dan keandalan dalam teknik sipil telah dibahas. Dimulai dari tinjauan kejadian dan kegagalan yang pernah terjadi di masa lalu, lalu berkembang pada pembahasan rinci mengenai bagaimana keandalan dan/atau risiko yang terkait dengan aktivitas rekayasa dapat dinilai dan dikendalikan secara kuantitatif dan konsisten.

Atas dasar teori probabilitas dan analisis statistik Bayesian, mula-mula diperkenalkan alat-alat klasik untuk analisis pohon logika dan analisis keandalan komponen teknis. Selanjutnya dipaparkan teori keandalan struktur, konsep dan alat untuk analisis keputusan Bayesian, dan akhirnya beberapa penerapan utama di bidang keandalan struktur.

Namun demikian, ada satu persoalan penting yang belum dibahas secara mendalam, yaitu pertanyaan: “seberapa aman itu sudah cukup aman?” Dengan kata lain, persyaratan apa yang harus dipenuhi terkait keselamatan aktivitas yang dianalisis, dan prinsip-prinsip fundamental apa yang harus diperhatikan ketika menilai apakah suatu risiko dapat diterima.

Nilai-nilai dasar masyarakat

Sebelum memasuki persoalan ini, perlu disadari bahwa masalah tersebut memiliki kaitan mendasar dan filosofis dengan hak-hak manusia. Kantor Komisaris Tinggi PBB untuk Hak Asasi Manusia mengatur hak-hak manusia melalui *Universal Declaration of Human Rights*. Teks lengkapnya tersedia pada laman PBB, namun di sini ditampilkan tiga pasal yang relevan sebagai rujukan cepat.

Pasal 1: Semua manusia dilahirkan merdeka dan setara dalam martabat dan hak. Mereka dikaruniai akal dan hati nurani, dan harus bertindak satu sama lain dalam semangat persaudaraan.

Pasal 3: Setiap orang berhak atas kehidupan, kebebasan, dan keamanan pribadi.

Pasal 7: Semua orang sama di hadapan hukum dan berhak, tanpa diskriminasi apa pun, atas perlindungan hukum yang setara. Semua orang juga berhak atas perlindungan yang sama terhadap segala bentuk diskriminasi yang melanggar deklarasi ini dan terhadap segala hasutan ke arah diskriminasi tersebut.

Pasal-pasal ini menegaskan kewajiban moral dan yuridis untuk memperlakukan semua manusia secara setara, serta menekankan hak atas keselamatan pribadi bagi setiap individu. Karena itu, kriteria apa pun yang dirumuskan terkait risiko yang dapat diterima harus selalu dijaga agar tidak melanggar prinsip-prinsip dasar hak asasi manusia tersebut.

Urutan sumber: halaman 13.3 - 13.4

Dari sudut pandang filosofis, nilai setiap kehidupan - tanpa memandang usia, ras, ataupun jenis kelamin - adalah tak terhingga. Dalam hal ini kebanyakan anggota masyarakat dapat sepakat, dan hal itu dipandang sebagai fakta dasar untuk pembahasan selanjutnya.

Namun keselamatan selalu memiliki biaya. Karena itu, tingkat keselamatan yang hendak dijamin bagi anggota masyarakat merupakan keputusan sosial yang sangat bergantung pada kemampuan masyarakat untuk menanggung biayanya. Walaupun masyarakat menganggap nilai setiap individu tak

terhingga, sumber daya yang tersedia tetap terbatas sehingga harus ada prioritas. Setiap pengambil keputusan yang mewakili masyarakat memiliki syarat batas dan keterbatasan tertentu terhadap keputusan yang dapat ia ambil.

Meskipun demikian, dengan merujuk pada Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia, wakil-wakil masyarakat memiliki kewajiban moral umum untuk mempertimbangkan semua investasi dan pengeluaran dalam terang pertanyaan: "apakah sumber daya ini sebenarnya bisa dipakai dengan cara yang lebih baik?" agar tujuan deklarasi itu lebih terpenuhi.

Preferensi dalam pengambilan keputusan

Ketika membahas "risiko yang dapat diterima", sering timbul kebingungan karena sebagian individu bisa memiliki pandangan yang berbeda dibandingkan masyarakat. Setiap individu mempunyai persepsi risikonya sendiri, atau dalam istilah teori keputusan, mempunyai "preferensi" sendiri.

Dalam menilai diterima tidaknya aktivitas yang berkaitan dengan teknik sipil - atau aktivitas lain yang dapat berdampak pada pihak ketiga - pertanyaan utamanya bukanlah preferensi setiap individu, melainkan preferensi masyarakat sebagaimana dinyatakan melalui Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia atau konvensi umum lain yang disepakati. Preferensi individu bahkan bisa bertentangan secara tajam dengan preferensi masyarakat. Karena itu, penerimaan risiko harus dilihat dari sudut pandang sosial, sambil tetap menjamin hak-hak dasar individu.

Hal ini menuntut pendekatan normatif dalam pemodelan preferensi dan dalam penetapan kriteria penerimaan risiko. Perbedaannya penting untuk dipahami. Besarnya risiko yang dianggap dapat diterima sangat subjektif dan sangat bergantung pada preferensi seseorang, yang pada gilirannya dipengaruhi oleh status sosial, kekayaan, pendidikan, keluarga, dan kondisi hidupnya.

Contoh klasik adalah pilot tempur Inggris pada Perang Dunia Kedua yang menolak menjalankan misi karena tingginya kegagalan mesin yang menyebabkan pesawat jatuh. Padahal, bila dibandingkan, kematian akibat pertempuran udara jauh lebih sering daripada kematian karena kegagalan mesin. Contoh ini menunjukkan bahwa preferensi personal memang sangat individual.

Preferensi yang dinyatakan melalui kuesioner atau wawancara biasa disebut *stated preferences*. Kajian statistik atas perilaku sering disebut *revealed preferences*. Sementara itu, preferensi yang dibentuk berdasarkan pemahaman penuh atas konsekuensi suatu pilihan disebut *informed preferences*. Banyak teknik telah dikembangkan untuk menilai dan memodelkan preferensi individu.

Stated preferences sering bermasalah karena hasilnya dapat bergantung penuh pada cara informasi dikumpulkan, misalnya cara pertanyaan dirumuskan. *Revealed preferences* memberi dasar yang lebih baik untuk memahami dan memodelkan preferensi, tetapi tidak ada jaminan bahwa preferensi semacam itu sesuai dengan prasyarat mendasar seperti Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia. Karena itu, *informed preferences* secara umum lebih diutamakan, walaupun tetap tidak bebas dari masalah, sebab cara menjelaskan konsekuensi suatu pilihan juga dapat memengaruhi preferensi yang terbentuk.

Dalam konteks keputusan sosial, tidak diragukan lagi bahwa masyarakat harus mengupayakan *informed preferences*. Peran insinyur adalah membantu menyediakan informasi bagi pengambil keputusan sosial - seperti politisi dan otoritas publik - mengenai risiko dan efisiensi berbagai opsi pengelolaan risiko. Selain itu, tugas penting lainnya adalah mengomunikasikan dengan jelas kepada pengambil keputusan maupun masyarakat umum tentang asumsi di balik hasil analisis risiko dan implikasinya terhadap opsi keputusan optimal yang telah diidentifikasi.

Bila seluruh aspek pengelolaan risiko sosial dikomunikasikan dengan baik, maka mekanisme demokrasi yang berfungsi dengan baik semestinya dapat menjadi dasar untuk menghadirkan preferensi yang benar-benar terinformasi ke dalam proses pengambilan keputusan masyarakat.

Pada bagian berikut akan diringkaskan format-format yang umum digunakan untuk menetapkan risiko kehidupan yang dapat diterima dalam rekayasa. Setelah itu dibahas aspek risiko terungkap (*revealed risks*) bagi anggota masyarakat, lalu ditunjukkan bahwa dari informasi statistik saja sebenarnya sudah

bisa diperoleh indikasi mengenai tingkat risiko kehidupan yang dapat diterima. Setelah itu persoalan penerimaan risiko akan dilihat dari perspektif sosial atau sosial-ekonomi untuk membangun dasar keputusan yang lebih kaya bagi investasi sosial yang optimal dalam keselamatan jiwa.

13.2 Format yang Umum Digunakan untuk Penerimaan Risiko

Format yang paling umum digunakan untuk merepresentasikan risiko yang dapat diterima adalah diagram Farmer atau diagram F-N, lihat Gambar 13.1.

Urutan sumber: halaman 13.5 - 13.6

Gambar 13.1: Diagram Farmer (atau diagram F-N) dengan penunjukan wilayah risiko yang dapat diterima, zona ALARP, dan wilayah risiko yang tidak dapat diterima.

Pada sumbu-x ditunjukkan konsekuensi, biasanya dalam jumlah korban jiwa, meskipun pada prinsipnya jenis konsekuensi lain juga dapat dipakai. Pada sumbu-y ditunjukkan probabilitas terjadinya kejadian yang bersesuaian. Diagram Farmer dapat dipakai untuk menggambarkan profil risiko suatu aktivitas tertentu atau jenis bahaya tertentu. Dengan cara ini, profil risiko dari berbagai bahaya alam, misalnya, dapat dibandingkan antarnegara ataupun antardaerah.

Namun, dalam perbandingan seperti itu perlu diperhatikan masalah ketergantungan skala, sebab probabilitas kejadian akan bergantung pada luas wilayah yang dianalisis dan juga pada horizon waktu dari aktivitas yang sedang dipertimbangkan.

Berbagai varian diagram Farmer telah dikembangkan, misalnya matriks risiko. Ciri umumnya sama, yaitu menggambarkan hubungan antara konsekuensi dan probabilitas dari kejadian yang memiliki konsekuensi tersebut. Biasanya matriks risiko didefinisikan dengan rentang konsekuensi dan probabilitas, atau bahkan sepenuhnya dalam istilah linguistik yang bersifat subjektif.

Gambar 13.2: Matriks risiko dengan penunjukan wilayah dapat diterima (hijau), ALARP (kuning), dan tidak dapat diterima (merah).

Representasi tipikal risiko yang dapat diterima ditunjukkan melalui diagram Farmer pada Gambar 13.1 dan matriks risiko pada Gambar 13.2. Dalam diagram tersebut, dua garis ditetapkan: garis atas mendefinisikan aktivitas atau kombinasi konsekuensi dan probabilitas yang dalam keadaan apa pun tidak dapat diterima, sedangkan garis bawah mendefinisikan aktivitas yang dalam semua keadaan dapat diterima. Wilayah di antara keduanya - sering disebut daerah abu-abu - adalah wilayah tempat pengurangan risiko diinginkan.

Dalam dokumen BUWAL (1991), diagram Farmer disajikan untuk berbagai indikator konsekuensi, misalnya hilangnya nyawa, pelepasan zat beracun, dan sebagainya. Wilayah dapat diterima dan tidak dapat diterima dapat berbeda untuk setiap indikator konsekuensi.

Diagram Farmer dipakai secara luas untuk mendefinisikan dan mendokumentasikan risiko yang dapat diterima. Untuk aktivitas yang berada di antara wilayah dapat diterima dan tidak dapat diterima, filosofi yang umum diterapkan adalah menerapkan langkah pengurangan risiko berdasarkan pertimbangan efisiensi biaya. Prinsip yang sering dipakai adalah *As Low As Reasonably Practicable* (ALARP), yang berarti pengurangan risiko harus dilakukan selama biayanya tidak secara tidak proporsional lebih besar daripada manfaat pengurangan risiko yang diperoleh.

Walaupun mudah digunakan, diagram Farmer memiliki kelemahan ketika dipakai untuk memvalidasi penerimaan risiko suatu aktivitas tertentu. Kelemahan itu adalah bahwa diagram ini tidak konsisten terhadap total risiko. Tiga kurva tangga dalam Gambar 13.1 menunjukkan profil risiko sosial dari tiga aktivitas berbeda. Dua di antaranya berada di bawah garis penerimaan dan karena itu langsung dianggap dapat diterima, sedangkan yang ketiga masuk ke daerah abu-abu sehingga tidak langsung dapat diterima. Namun bila total risiko dari ketiga aktivitas itu dihitung, bisa saja aktivitas yang “langsung diterima” justru memiliki total risiko lebih besar daripada aktivitas yang belum langsung diterima. Karena itu, patut dipertanyakan apakah diagram Farmer selalu diterapkan secara tepat dalam praktik.

Dalam industri lepas pantai, format lain yang dipakai untuk kriteria penerimaan keselamatan jiwa adalah *Fatal Accident Rate* (FAR). FAR didefinisikan sebagai:

$$FAR = PLL \times 10^8 / (N_p \times H_p) \quad (13.1)$$

dengan N_p adalah jumlah orang pada suatu fasilitas lepas pantai dan H_p adalah jumlah jam paparan per tahun. Jika semua orang di fasilitas itu bekerja dan tinggal di sana, maka $H_p = 365 \times 24 = 8760$ jam/tahun. PLL (*Potential Loss of Lives*) adalah jumlah harapan korban jiwa per tahun. Jika diasumsikan kejadian kehilangan total fasilitas memiliki probabilitas tahunan P_F dan semua orang akan menjadi korban, maka:

$$PLL = P_F \times N_p \quad (13.2)$$

Rentang tipikal FAR yang dapat diterima berada pada interval 10-15.

Urutan sumber: halaman 13.7 - 13.9

13.3 Risiko yang Terungkap dalam Masyarakat

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan berbagai format untuk menetapkan risiko yang dapat diterima. Dalam praktik, keputusan tentang diterima tidaknya risiko sering dibuat oleh para ahli dan didukung oleh studi biaya-manfaat serta perbandingan dengan praktik masa lalu. Sampai belum lama ini, pendekatan dominan adalah menggunakan risiko yang pernah dialami dan tampaknya diterima di masa lalu sebagai pedoman untuk menentukan risiko apa yang patut diterima di masa depan.

Risiko keselamatan jiwa yang dialami

Dengan melihat angka risiko kematian per 100.000 orang per tahun seperti pada Tabel 13.1 - yang diadaptasi dari Schneider (1994) - dapat diperoleh gambaran urutan besar risiko kehidupan yang dialami pada masa lalu.

Rata-rata semua penyebab	Risiko kematian pekerjaan
110 (usia 25 tahun)	100 - penebang kayu dan angkutan kayu
100 (usia 35 tahun)	90 - kehutanan
300 (usia 45 tahun)	50 - pekerjaan konstruksi
800 (usia 55 tahun)	15 - industri kimia
2000 (usia 65 tahun)	10 - produksi mekanik
5000 (usia 75 tahun)	5 - pekerjaan kantor
Risiko lain-lain	Risiko lain-lain
400 - 20 batang rokok per hari	5 - pendakian gunung
300 - 1 botol anggur per hari	3 - 10.000 km transportasi jalan raya
150 - berkendara motor	1 - kecelakaan pesawat (per perjalanan)
100 - gantole	1 - kebakaran di gedung
20 - mengemudi mobil (usia 20-24)	1 - 10.000 km perjalanan kereta
10 - pejalan kaki (rumah tangga)	0,2 - kematian akibat gempa bumi (California)
10 - 10.000 km transportasi mobil	0,1 - kematian akibat tersambar petir

Tabel 13.1: Tingkat kematian per 100.000 orang per tahun untuk berbagai pekerjaan dan aktivitas.

Dari tabel ini tampak bahwa tingkat kematian berbeda sangat signifikan antarjenis pekerjaan. Jelas bahwa setiap rumah tangga memerlukan pendapatan, dan sampai batas tertentu kriteria penerimaan yang diatur masyarakat bertujuan melindungi individu dari eksploitasi pihak ketiga yang memanfaatkan situasi dan preferensi pribadi mereka.

Dari angka-angka tersebut juga dapat dikenali adanya hubungan antara tingkat risiko yang tampaknya diterima individu, derajat kesukarelaan suatu aktivitas, dan tingkat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan aktivitas itu. Risiko tinggi pada aktivitas seperti berkendara motor, misalnya, lebih mudah diterima karena dilakukan secara sukarela dan pengendara merasa dirinya memegang kendali. Sebaliknya, risiko pekerjaan pada umumnya jauh lebih kecil bagi sebagian besar orang.

Gambar 13.3: Ilustrasi hubungan antara tingkat kesukarelaan, tingkat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan suatu aktivitas, dan jenis aktivitas yang diterima individu.

Gambar 13.4: Ilustrasi hubungan antara tingkat kesukarelaan, tingkat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan suatu aktivitas, dan tingkat kuantitatif risiko yang tampaknya diterima individu. Angka pada gambar dikalikan dengan 10^{-5} .

Berdasarkan pengalaman seperti pada Tabel 13.1 serta sumber informasi lain, aktivitas-aktivitas pada Gambar 13.3 dapat dikaitkan dengan probabilitas kematian, sehingga diperoleh gradasi kuantitatif risiko yang dapat diterima sebagai fungsi dari derajat kesukarelaan dan pengaruh pribadi terhadap keberhasilan aktivitas. Hasilnya diperlihatkan pada Gambar 13.4.

Menarik untuk diperhatikan bahwa pada sudut kiri atas gambar, aktivitas benar-benar bersifat individual: tingkat kesukarelaan tinggi dan pengaruh pribadi terhadap hasil aktivitas juga tinggi. Sebaliknya, pada sudut kiri bawah, aktivitas tidak sungguh-sungguh individual: tidak sukarela dan keberhasilannya tidak dikendalikan oleh orang yang terlibat. Untuk aktivitas semacam inilah masyarakat berkewajiban melindungi individu sesuai Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia. Dari Gambar 13.4 tampak bahwa nilai sekitar 10^{-5} dapat mendekati nilai yang secara umum diterima, meskipun nanti ditunjukkan bahwa dasar penilaian yang lebih halus masih dapat dibangun.

Risiko yang dialami pada aktivitas komersial tertentu

Pada diagram Farmer di Gambar 13.1, frekuensi teramati dan kerugian yang bersesuaian telah diplot untuk kejadian kegagalan pada sektor lepas pantai, maritim, pertambangan, penerbangan, dan energi air.

Gambar 13.5: Diagram Farmer dengan indikasi risiko yang pernah dialami dalam berbagai aktivitas sosial pada masa lalu.

Dengan memplot kriteria tipikal penerimaan risiko ke dalam diagram tersebut, terlihat bahwa tidak semua risiko berada di domain yang dapat diterima. Juga terlihat adanya variasi besar antar-sektor. Contohnya, sektor penerbangan komersial menunjukkan risiko teramati yang sangat kecil, sedangkan sektor pelayaran dagang dapat menunjukkan kondisi sebaliknya.

Salah satu penjelasan mungkin adalah bahwa risiko yang teramati hanya menunjukkan kerugian, bukan peluang atau keuntungan yang menyertai aktivitas tersebut. Pada pelayaran dagang maupun eksplorasi minyak dan gas, keuntungan potensial sangat besar, sehingga walaupun kerugian pernah terjadi, manfaat yang dicapai tetap mungkin besar. Sebaliknya, pada penerbangan komersial, pendapatan sangat bergantung pada kepercayaan pelanggan terhadap keselamatan yang diberikan maskapai. Ini menunjukkan bahwa tingkat keselamatan aktual dalam berbagai aktivitas sosial mungkin sebagian didorong oleh mekanisme pasar, dan hanya sebagian lain oleh pengelolaan yang adil.

Urutan sumber: halaman 13.10 - 13.13

13.4 Penyelamatan Nyawa dan Kinerja Masyarakat

Menyelamatkan nyawa dalam masyarakat, sebagaimana telah beberapa kali ditekankan, adalah tanggung jawab pengambil keputusan sosial. Para insinyur, bersama profesi lain, memberi dukungan keputusan mengenai bagaimana aktivitas penyelamatan jiwa dapat dilakukan dengan cara yang paling efisien. Memang tenaga kesehatan seperti dokter, perawat, dan peneliti lebih langsung terlibat dalam penyelamatan jiwa, tetapi banyak profesi lain juga bekerja dengan agenda yang sama.

Tabel 13.2 menunjukkan bahwa efisiensi penyelamatan jiwa berbeda sangat besar menurut sektor dan jenis aktivitas yang dipertimbangkan.

Biaya pengurangan risiko per satuan aktivitas yang diselamatkan (SFr)	Sektor/aktivitas
100	Vaksinasi massal - dunia ketiga
1×10^3	Fasilitas rontgen medis
2×10^3	Pemakaian helm pengendara motor
5×10^3	Ambulans jantung
20×10^3	Layanan helikopter darurat
100×10^3	Sabuk keselamatan pada mobil
hingga 500×10^3	Restrukturisasi persimpangan / dialisis ginjal / keandalan struktur
5×10^6	Kereta kota Zurich, Alp Transit
10×10^6	Standar gempa SIA
20×10^6	Keselamatan tambang di AS
50×10^6	DC-10 dihentikan dari layanan
100×10^6	Regulasi gedung bertingkat banyak
1×10^9	Penghilangan asbes dari bangunan umum

Tabel 13.2: Biaya pengurangan risiko (SFr per nyawa yang diselamatkan), berdasarkan Schneider (1994).

Dari tabel ini tampak perbedaan yang sangat besar dalam efisiensi biaya dari berbagai tindakan pengurangan risiko. Tabel itu juga menunjukkan ketidakrasionalan beberapa tindakan yang pernah diambil, misalnya penggantian material bangunan yang mengandung asbes di sekolah dan bangunan umum pada tahun 1990-an. Sumber daya ekonomi yang dipakai untuk menyelamatkan satu orang dengan tindakan ekstrem itu secara teoritis dapat menyelamatkan jutaan orang di dunia ketiga jika digunakan untuk vaksinasi massal.

Pada tingkat pengambilan keputusan sosial tertinggi, persoalan besarnya adalah bagaimana memprioritaskan investasi antar-sektor, seperti sektor kesehatan, transportasi umum, infrastruktur, energi, dan lain-lain. Jelas bahwa keputusan semacam ini tidak bisa hanya berfokus pada keselamatan individu, tetapi juga harus mempertimbangkan perkembangan umum masyarakat dan faktor-faktor lain yang memengaruhi kualitas hidup manusia. Ini adalah masalah kompleks yang melibatkan ketersediaan sumber daya alam, efektivitas produksi, stabilitas sosial, dan batas-batas lingkungan.

Gambar 13.6: Ilustrasi keterkaitan berbagai aktivitas sosial yang memengaruhi kualitas hidup individu dalam masyarakat.

Kinerja berbagai masyarakat di dunia dinilai dan dipantau oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa. Indeks yang paling luas dipakai untuk menilai perkembangan suatu negara adalah *Human Development Index* (HDI). Namun demikian, terdapat banyak indeks lain yang masing-masing menyoroti karakteristik perkembangan tertentu dari suatu negara.

Menurut data PBB, HDI dihitung sebagai rata-rata dari tiga indeks demografis lain, yaitu indeks Produk Domestik Bruto (GDP Index), indeks Pendidikan (EI), dan indeks Harapan Hidup (LEI):

$$\text{HDI} = 1/3 \text{ GDP Index} + 1/3 \text{ EI} + 1/3 \text{ LEI} \quad (13.3)$$

GDP Index dihitung sebagai:

$$\text{GDP Index} = [\log(\text{GDP}_{\text{pc}}) - \log(100)] / [\log(40000) - \log(100)] \quad (13.4)$$

dengan GDP_{pc} adalah PDB per kapita yang telah disesuaikan dengan paritas daya beli dalam dolar AS. Nilai $\log(40000)$ dan $\log(100)$ masing-masing mewakili batas tertinggi dan terendah GDP_{pc} dari

negara-negara yang dinilai.

Indeks pendidikan EI dinilai sebagai:

$$EI = 2/3 \text{ ALI} + 1/3 \text{ GEI} \quad (13.5)$$

dengan ALI (*Adult Literacy Index*) dihitung sebagai:

$$ALI = (\text{ALR} - 0) / (100 - 0) \quad (13.6)$$

ALR adalah tingkat melek huruf orang dewasa. GEI (*Gross Enrolment Index*) menunjukkan berapa banyak calon peserta didik yang benar-benar terdaftar. GEI dihitung sebagai:

$$GEI = (\text{GER} - 0) / (100 - 0) \quad (13.7)$$

dengan GER adalah rasio pendaftaran kasar gabungan. Terakhir, indeks harapan hidup dihitung sebagai:

$$LEI = (\text{LE} - 25) / (85 - 25) \quad (13.8)$$

LE adalah harapan hidup saat lahir dalam tahun. Angka 85 dan 25 mewakili batas tertinggi dan terendah yang diasumsikan. PBB menerbitkan HDI setiap tahun untuk tiap negara. Gambar 13.7 menunjukkan peta HDI dunia tahun 2004.

Gambar 13.7: Ilustrasi HDI negara-negara di dunia.

Dari Gambar 13.7 diperoleh gambaran umum untuk membandingkan kinerja berbagai negara. Namun, meskipun HDI memiliki banyak kelebihan, ada aspek perkembangan sosial yang tidak terwakili di dalamnya. Salah satunya adalah bagaimana pendapatan suatu negara didistribusikan kepada penduduknya. Untuk itu, indeks Gini dapat dipakai sebagai ilustrasi. Pada Gambar 13.8 dipetakan indeks Gini seluruh dunia untuk tahun 2004. Jika pendapatan terdistribusi sepenuhnya merata, nilai indeks Gini akan sama dengan nol.

Gambar 13.8: Ilustrasi distribusi pendapatan (indeks Gini) untuk berbagai negara di dunia.

Dalam Kuliah 1 telah dibahas perkembangan PDB per kapita dan harapan hidup saat lahir, dan ditunjukkan bahwa untuk Swiss indikator-indikator demografis tersebut telah berkembang sangat besar selama 100 tahun terakhir. Perkembangan ini tidak hanya khas Swiss, tetapi juga mencirikan bangsa-bangsa yang tumbuh di bawah kapitalisme demokratis.

Kenaikan harapan hidup merefleksikan banyak perubahan: cara hidup, kualitas perumahan, sistem sanitasi, ketersediaan dan mutu makanan, pendidikan kesehatan umum, kemajuan riset, dan perkembangan sektor medis. Di sisi lain, perkembangan GDP juga mengandung banyak efek dan diyakini sangat terkait dengan harapan hidup, misalnya melalui pendidikan dan pembentukan tenaga kerja yang kemudian mendorong industrialisasi.

Dengan demikian, harapan hidup dan GDP menangkap jauh lebih banyak hal daripada sekadar “uang” dan “tahun”, dan dapat dipandang sebagai deskriptor kuat perkembangan masyarakat. Masuknya indeks pendidikan ke dalam HDI memang membantu menunjukkan peluang pembangunan yang belum tergarap, tetapi secara implisit aspek pendidikan sebenarnya sudah tercermin dalam LEI dan GDP Index.

Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, *revealed preferences* lebih disukai daripada *stated preferences*. Pada bagian berikut akan dijelaskan bagaimana, berdasarkan indikator-indikator demografis, preferensi masyarakat mengenai investasi untuk penyelamatan jiwa dapat disimpulkan.

Urutan sumber: halaman 13.14 - 13.18

13.5 Memodelkan Risiko yang Dapat Diterima secara Sosial-Ekonomi

Secara umum diterima bahwa keputusan mengenai perencanaan, desain, pelaksanaan, operasi, dan penghentian infrastruktur sosial harus didasarkan pada optimasi manfaat siklus hidup dengan menggunakan prinsip-prinsip pengambilan keputusan dan penilaian risiko. Namun selain risiko kerugian

ekonomi, pengambil keputusan juga harus memperhitungkan risiko korban jiwa, cedera, dan potensi kerusakan lingkungan.

Kriteria penerimaan risiko yang rasional dalam konteks keputusan sosial dapat diturunkan dari pertimbangan sosial-ekonomi. Memang benar bahwa individu dalam masyarakat melakukan aktivitas berbahaya demi keuntungan ekonomi atau pemenuhan diri. Dari sudut pandang sosial, individu harus dilindungi dari eksploitasi oleh pihak ketiga; tetapi tidak selalu jelas sejauh mana risiko sukarela perlu diatur selama tidak melibatkan orang lain. Dalam konteks ini, perspektif yang diambil adalah bahwa keputusan sosial tentang investasi keselamatan jiwa hanya berkaitan dengan risiko tak sukarela di ranah publik, terutama yang berhubungan dengan fungsi-fungsi masyarakat.

Diasumsikan pula bahwa pengurangan risiko selalu terkait dengan realokasi sumber daya ekonomi masyarakat. Pada infrastruktur yang berumur panjang - puluhan bahkan ratusan tahun - alokasi sumber daya tersebut harus dilakukan seefisien mungkin dan dengan mempertimbangkan keterterimaan antargenerasi.

Pada tingkat keputusan sosial, suatu aktivitas penyelamatan jiwa yang efisien dapat dipahami sebagai tindakan yang, dengan cara paling hemat biaya, menurunkan mortalitas atau setara dengan meningkatkan harapan hidup statistik.

Indeks Kualitas Hidup (LQI)

Pada dasarnya, satu-satunya aset yang benar-benar dimiliki individu adalah waktu. Waktu dapat dipakai untuk realisasi diri, tetapi juga dapat ditukar dengan barang dan penghasilan. Nilai waktu bergantung pada kondisi hidup individu. Semakin baik kondisi hidup, semakin tinggi nilai waktu, dan semakin besar kecenderungan untuk memakai waktu bagi kepentingan pribadi. Karena itu, model kualitas hidup harus mempertimbangkan waktu yang tersedia untuk keperluan pribadi dan kemampuan untuk menikmatinya. Inti persoalan di sini adalah waktu dalam kondisi sehat.

Peningkatan harapan hidup melalui pengurangan risiko, pengurangan sumber daya ekonomi yang menyertainya, pendapatan nasional, dan proporsi waktu yang dipakai untuk bekerja - semua dinilai pada tingkat kehidupan statistik suatu masyarakat - merupakan blok penyusun utama untuk menilai efisiensi langkah-langkah pengurangan risiko. Atas dasar indikator demografis inilah LQI memfasilitasi pengembangan kriteria penerimaan risiko.

Gagasan dasar LQI adalah memodelkan preferensi masyarakat secara kuantitatif sebagai indikator sosial berbentuk skalar yang dibentuk oleh hubungan antara bagian GDP per kapita yang tersedia untuk keperluan pengurangan risiko (g), harapan hidup saat lahir (l), dan proporsi hidup yang dipakai untuk mencari nafkah (w). Dalam bentuk dasarnya:

$$L(g, l) = g^q l \quad (13.9)$$

Parameter q mengukur pertukaran antara sumber daya untuk konsumsi dan nilai waktu hidup sehat. Nilai ini bergantung pada fraksi kehidupan yang dialokasikan untuk aktivitas ekonomi dan juga memperhitungkan bahwa hanya sebagian GDP diperoleh melalui kerja manusia, sementara bagian lain berasal dari hasil investasi. Konstanta q dinilai sebagai:

$$q = (1/\beta) \times w / (1-w) \quad (13.10)$$

di mana β adalah konstanta yang memperhitungkan bahwa hanya sebagian GDP berbasis tenaga kerja manusia, sedangkan bagian lain berasal dari investasi. Setiap langkah pengurangan risiko akan memengaruhi nilai LQI. Prinsip bahwa investasi untuk mengurangi risiko kehidupan harus menghasilkan kenaikan LQI menuntun pada kriteria penerimaan risiko berikut:

$$dg/g + (1/q) dl/l \geq 0 \quad (13.11)$$

Dari sini, kemauan masyarakat untuk berinvestasi dalam aktivitas penyelamatan jiwa (*societal willingness to pay*) dinilai sebagai:

$$SWTP = dg = -(g/q) (dl/l) \quad (13.12)$$

Suatu tindakan pengurangan risiko kehidupan berarti alokasi dg dan peningkatan harapan hidup dl yang bersesuaian. Untuk Swiss, konstanta demografis yang dipakai ditunjukkan pada Tabel 13.2.

GDP	59451 SFr
I	80,4 tahun
w	0,112
beta	0,722
g	35931 SFr
q	0,175

Tabel 13.2: Konstanta demografis untuk Swiss (BFS, 2004).

Berdasarkan Persamaan (13.11), hubungan antara dg dan dl yang menyebabkan kenaikan LQI dapat ditentukan dan kemudian digunakan untuk menilai probabilitas yang dapat diterima dari berbagai jenis kegagalan yang relevan bagi suatu sistem.

SWTP sebagai dasar kriteria keterterimaan

Dalam aplikasi keandalan struktur, perubahan relatif harapan hidup dl/I dapat dipertukarkan dengan perubahan mortalitas dmu sebagai berikut:

$$dl/I \sim C_x dmu = C_x k dm \quad (13.13)$$

di mana dm adalah laju kegagalan, C_x adalah konstanta ekonomi-demografis untuk skema pengurangan mortalitas tertentu, dan k adalah probabilitas meninggal jika kegagalan terjadi. Untuk kegagalan struktur, pendekatan konservatif adalah mengambil $k = 1$.

Maka diperoleh:

$$dC_y = (g/q) C_x N_{PE} k dm \quad (13.14)$$

dengan dC_y adalah investasi tahunan yang seharusnya ditanamkan untuk keselamatan jiwa dan N_{PE} adalah jumlah orang yang terekspos pada kegagalan. Berdasarkan Persamaan (13.14) dan (13.11), kriteria penerimaan dapat dituliskan sebagai:

$$dC_y \geq (g/q) C_x N_{PE} k dm(p) \quad (13.15)$$

di mana $dm(p)$ sekarang dinyatakan sebagai fungsi dari p, yaitu alternatif-alternatif keputusan untuk pengurangan risiko. Artinya, langkah pengurangan risiko perlu dilakukan selama pengurangan risiko marginal masih lebih besar daripada biaya marginal pengurangan risiko. Prinsip ini diperlihatkan dalam Gambar 13.9.

Gambar 13.9: Ilustrasi penggunaan kriteria SWTP sebagai dasar untuk menilai keputusan yang dapat diterima dan laju kegagalan yang dapat diterima pada fasilitas hasil rekayasa.

Pada Gambar 13.9 diperlihatkan bagaimana laju kegagalan $m(p)$ dan biaya pengurangan risiko yang dinormalisasi bergantung pada parameter keputusan p. Dalam ilustrasi tersebut diasumsikan biaya pengurangan risiko bersifat linear terhadap p, misalnya ketika p mewakili dimensi penampang suatu komponen struktur. Sebaliknya, laju kegagalan $m(p)$ umumnya merupakan fungsi nonlinier dari p.

Menurut kriteria SWTP, parameter keputusan harus ditingkatkan selama gradien $dm(p)/dp$ lebih besar daripada $[q/(C_x N_{PE} k g)] dC_y(p)/dp$. Titik p ketika kedua gradien sama besar menyatakan alternatif dengan laju kegagalan tertinggi yang masih dapat diterima. Nilai p yang lebih besar dari titik itu dianggap dapat diterima menurut kriteria SWTP. Untuk opsi keputusan yang bersifat diskret, fungsi-fungsi tersebut mungkin tidak terdiferensiasi, tetapi logika yang sama tetap berlaku: tindakan diskret pengurangan risiko harus dilakukan selama biaya ternormalisasinya masih lebih kecil daripada pengurangan laju kegagalan yang dihasilkan.

Nilai sosial dari satu kehidupan statistik

Bagian sebelumnya menunjukkan bagaimana kriteria keterterimaan risiko jiwa dapat diturunkan dari LQI. Kriteria ini berfungsi sebagai pembatas bagi alternatif keputusan yang secara ekonomi layak. Namun hukum modern pada umumnya mensyaratkan bahwa keluarga atau tanggungan korban yang meninggal akibat kecelakaan memperoleh kompensasi. Karena itu biaya kompensasi perlu dimasukkan ke dalam fungsi manfaat yang dioptimalkan.

Pendekatan praktis untuk menilai biaya kompensasi sangat beragam, dan sistem hukum di Amerika Utara maupun Eropa dapat menghasilkan nilai kompensasi yang sangat berbeda. Meski demikian, dasar yang konsisten untuk menilai biaya kompensasi juga dapat dibangun melalui LQI. Berdasarkan Persamaan (13.9), nilai sosial satu kehidupan statistik (*Societal Value of a Statistical Life*, SVSL) dapat ditaksir dengan:

$$SVSL = (g/q) E \quad (13.16)$$

dengan E adalah harapan hidup diskonto rata-rata usia saat lahir. Jika digunakan diskonto efektif 2% per tahun, E dapat bernilai sekitar 28,3 dan SVSL yang bersesuaian mendekati 6 juta SFr. Nilai ini seharusnya dimasukkan ke dalam fungsi manfaat sebagai konsekuensi dari setiap kehilangan jiwa yang mungkin terjadi karena suatu alternatif keputusan.

Contoh 13.1 - Optimasi desain sebuah batang baja

Pertimbangkan sebuah batang baja yang menerima tarik murni. Batang akan gagal bila tegangan yang bekerja melampaui tegangan luluh baja. Kuat luluh batang R dan pembebanan S diasumsikan tak pasti dan dimodelkan sebagai peubah acak Normal yang tidak berkorelasi. Nilai rata-rata beban diambil 200 MPa dengan koefisien variasi $v_S = 0,2$. Koefisien variasi kuat luluh $v_R = 0,1$. Diberikan pula:

$$\mu_S = 200 \text{ MPa}; \sigma_S = 40 \text{ MPa}; v_R = \sigma_R / \mu_R = 0,1$$

Tujuan contoh ini adalah menjawab pertanyaan: kuat luluh berapa yang sudah cukup, dan kuat luluh berapa yang memaksimalkan utilitas pemilik?

Diasumsikan jumlah rata-rata orang yang terdampak oleh suatu kegagalan adalah $N_{PE} = 15$, probabilitas meninggal bila batang gagal adalah $k = 1$, dan biaya baja bergantung pada kuat luluh. Biaya tersebut diambil sebesar 115 kali nilai rata-rata kuat luluh μ_R , sehingga:

$$k = 1; N_{PE} = 15; C_Y(p) = 115 \mu_R \text{ CHF}$$

Laju kegagalan batang baja dihitung sebagai:

$$m(p) = -\ln[1 - \Phi((p - \mu_S) / \sqrt{(0,1p)^2 + \sigma_S^2})] \quad (13.17)$$

Kriteria penerimaan LQI menurut Persamaan (13.15) berbentuk:

$$dm(p)/dp - [q/(C_X N_{PE} k g)] dC_Y(p)/dp < 0$$

Dalam contoh ini, kriteria tersebut terpenuhi untuk kuat luluh lebih besar dari 434 MPa, yang setara dengan probabilitas kegagalan $P_f = 3,675 \times 10^{-5}$.

Untuk elemen struktur yang dipertimbangkan, kuat luluh di atas 434 MPa dapat diterima. Namun pertanyaan selanjutnya adalah: manakah keputusan yang optimal? Titik optimum diperoleh dengan memaksimumkan fungsi tujuan berikut:

$$Z(p) = B(p) - C_Y(p) - m(p) [C_Y(p) + k N_{PE} SVSL + C_U] \quad (13.18)$$

Di sini seluruh manfaat dan biaya harapan telah diperhitungkan. $B(p)$ menyatakan manfaat dari elemen struktur, dan C_U adalah biaya pembersihan yang diharapkan setelah kegagalan:

$$C_U = 10.000 \text{ CHF}; B(p) = 100.000 \text{ CHF}$$

Dalam fungsi tujuan tersebut, kematian diperhitungkan melalui nilai sosial kehidupan statistik. Gambar 13.10 memperlihatkan hasil contoh ini. Manfaat maksimum dicapai pada kuat luluh 441 MPa dengan probabilitas kegagalan $P_f = 2,595 \times 10^{-5}$. Karena nilai optimum ini lebih besar dari nilai minimum yang

disyaratkan oleh kriteria LQI, maka keputusan optimum tersebut dapat diterima.

Dalam banyak persoalan teknik sipil, manfaat suatu struktur atau bagian struktur tidak diketahui secara pasti dan sering kali tidak bergantung pada parameter desain p . Bila fungsi tujuan diturunkan untuk mencari titik maksimum, komponen manfaat dapat hilang sehingga solusi optimum menjadi tidak bergantung pada besaran manfaat B .

Gambar 13.10: Ilustrasi hasil Contoh 13.1.

Urutan sumber: halaman 13.20 - 13.24

13.6 Pengambilan Keputusan Berkelanjutan

Sampai pada titik ini belum ada pembahasan khusus tentang bagaimana menurunkan keputusan yang optimal juga dari sudut pandang keberlanjutan. Bagian ini membahas persoalan tersebut dengan fokus pada keberlanjutan sosial-ekonomi.

Indikator keberlanjutan

Untuk menilai keberlanjutan suatu keputusan rekayasa secara kuantitatif, dan agar tersedia dasar bagi pengambilan keputusan yang konsisten, terlebih dahulu harus dibangun representasi tentang apa yang dimaksud dengan keberlanjutan dalam bentuk indikator-indikator yang dapat diamati dan dihubungkan dengan preferensi masyarakat. Secara umum diterima bahwa keberlanjutan mengacu pada pertimbangan bersama atas tiga pemangku kepentingan utama, yaitu masyarakat, lingkungan, dan ekonomi.

Selain itu, keberlanjutan menuntut agar ketiga pemangku kepentingan tersebut tidak hanya diperhatikan untuk generasi sekarang tetapi juga untuk seluruh generasi mendatang. Saat ini arah pemikiran banyak tertuju pada penyusunan indikator keberlanjutan bagi lingkungan melalui daftar panjang kualitas lingkungan yang dapat diamati, misalnya ketersediaan air minum, ketersediaan sumber daya yang tidak dapat didaur ulang, dan sebagainya.

Berbagai kerangka indikator sudah pernah diusulkan, misalnya dalam MONET, laporan Komunitas Eropa, dan kajian statistik Lomborg. Hasil karya-karya tersebut membantu mengarahkan fokus pengambilan keputusan pada area yang benar-benar penting atau pada masalah yang sudah mulai muncul. Akan tetapi, untuk benar-benar mengidentifikasi strategi dan kebijakan sosial yang meningkatkan keberlanjutan, masih diperlukan dasar teoretis yang mantap yang secara konsisten menilai serta menimbang manfaat dan biaya bagi masyarakat, ekonomi, dan lingkungan - baik untuk generasi kini maupun generasi mendatang.

Dampak terhadap ekonomi dan masyarakat

Kerugian ekonomi langsung umumnya mudah dinilai dan tidak dibahas lebih lanjut di sini. Kerugian ekonomi tidak langsung, misalnya akibat kegagalan struktur dan kejadian merugikan lainnya, membutuhkan perhatian lebih karena harus mencakup dampak pada perekonomian umum akibat gangguan usaha.

Untuk peninjauan simultan antara masyarakat dan ekonomi, kerangka yang konsisten tampaknya sudah tersedia melalui pendekatan LQI sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya.

Dampak terhadap lingkungan

Bagi pemangku kepentingan lingkungan, konsekuensi merugikan dari keputusan rekayasa dapat dibagi ke dalam beberapa kategori menurut sifat dampaknya. Untuk dampak yang dapat dihubungkan dengan peningkatan mortalitas dan morbiditas manusia, sejumlah peneliti menelaah cara menilai kelayakan pengurangan risiko dengan memodifikasi pendekatan LQI agar memperhitungkan kemungkinan efek tertunda dari morbiditas terhadap mortalitas.

Untuk kerusakan kualitas lingkungan yang tidak diketahui hubungannya dengan morbiditas dan mortalitas manusia, telah diusulkan pendekatan yang disebut *Environmental Quality Index* (EQI). Gagasan dasarnya adalah menilai kemauan membayar guna menghindari kerusakan semacam itu berdasarkan karakter dan lamanya kerusakan.

Adapun kerusakan ekosistem akibat kepunahan spesies sampai sekarang belum memiliki dasar yang kuat untuk dihubungkan langsung dengan skala sosial maupun moneter. Sejauh ini sebagian besar pekerjaan masih terarah pada identifikasi spesies yang dianggap kritis bagi ekosistem manusia. Eksploitasi sumber daya alam yang tak dapat didaur ulang memiliki karakter yang mirip dengan kerusakan berupa kepunahan spesies. Dalam jangka pendek kerusakan itu mungkin tampak tidak penting, tetapi dalam jangka panjang signifikansinya belum benar-benar dipahami.

Pengambilan keputusan antargenerasi

Bagian berikut mengusulkan kerangka umum pengambilan keputusan berkelanjutan dengan penekanan khusus pada aspek antargenerasi. Dalam rekayasa sipil, pengambilan keputusan sering didasarkan pada persoalan optimasi dengan bentuk umum:

$$\max_{\text{over } a(0)} : U(a(0)) \quad (13.19)$$

di mana $U(\cdot)$ adalah total manfaat siklus hidup yang diharapkan dan $a(0)$ adalah vektor alternatif keputusan. Parameter 0 menunjukkan bahwa keputusan, meskipun dapat melibatkan aktivitas di masa depan, diambil pada waktu $t = 0$ oleh pengambil keputusan saat ini (generasi sekarang). Dalam formulasi ini, utilitas secara implisit disamakan dengan manfaat moneter.

Sesuai formulasi biaya siklus hidup, total manfaat siklus hidup yang diharapkan selama periode acuan T dinilai sebagai:

$$U(a(0)) = \int_0^T v(t, a(0)) \gamma(t) dt \quad (13.20)$$

di mana $v(\cdot, \cdot)$ adalah manfaat harapan per satuan waktu dan $\gamma(t)$ adalah fungsi yang mengkapitalisasi manfaat masa depan ke nilai sekarang. Jika keadilan antargenerasi dijadikan prinsip, maka fungsi manfaat ini harus diperluas agar juga mencerminkan preferensi dan manfaat yang dinikmati pengambil keputusan masa depan.

Prinsip tersebut diilustrasikan pada Gambar 13.11. Gambar itu menunjukkan bahwa eksploitasi sumber daya dan manfaat yang dihasilkannya dapat dipindahkan antar pengambil keputusan pada waktu yang berbeda. Jika suatu generasi mengeksploitasi sumber daya yang hanya sebagian dapat didaur ulang, maka sebagian manfaat yang dinikmati generasi itu harus ditransfer ke generasi berikutnya. Dalam istilah moneter, transfer itu harus setara dengan biaya daur ulang ditambah kompensasi atas hilangnya sumber daya yang tidak dapat didaur ulang. Kompensasi itu, misalnya, dapat berupa investasi riset yang bertujuan menggantikan sumber daya tersebut dengan sumber daya yang sepenuhnya dapat didaur ulang.

Biaya, seperti biaya pemeliharaan struktur, juga dapat dipindahkan di antara pengambil keputusan dari waktu ke waktu. Dalam Gambar 13.11, pengambil keputusan gabungan diasumsikan membuat keputusan demi kebaikan semua pihak - termasuk pengambil keputusan masa depan - dengan memberi bobot yang sama kepada preferensi generasi kini dan generasi mendatang.

Gambar 13.11: Ilustrasi interaksi antara pengambil keputusan saat ini dan pengambil keputusan masa depan.

Dengan prinsip ini, manfaat harus dijumlahkan melintasi pengambil keputusan masa kini dan masa depan sebagaimana manfaat itu dipandang dari perspektif mereka masing-masing, lalu dikapitalisasi ke titik waktu mereka sendiri. Tingkat bunga $\gamma(t)$ yang dipertimbangkan untuk generasi sekarang dan masa depan harus mewakili seluruh alasan diskonto yang berlaku, seperti preferensi subjektif murni maupun faktor makroekonomi seperti pertumbuhan kekayaan masyarakat.

Pertumbuhan kesejahteraan sosial juga dapat dan seharusnya diperhitungkan untuk mengompensasi kemampuan ekonomi yang lebih baik dari pengambil keputusan masa depan. Karena itu, manfaat bagi pengambil keputusan masa depan harus diberi bobot (dikurangi) dalam persoalan keputusan keseluruhan melalui faktor diskonto $\delta(t)$.

Fungsi manfaat bagi pengambil keputusan gabungan kemudian dapat dituliskan sebagai:

$$U(a(T)) = \sum_i [\delta(t_i) \int_{t_i}^{t_{i+1}} v_i(\tau, a(t_i), t_i) \gamma(\tau - t_i) d\tau] \quad (13.21)$$

di mana $v_i(\dots)$ adalah fungsi tingkat manfaat untuk generasi ke- i , dan $a(T)$ adalah himpunan alternatif keputusan bagi para pengambil keputusan pada waktu-waktu $t_1, t_2, \dots, t_n$.

Berdasarkan Persamaan (13.21), optimasi keputusan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan sejauh pengetahuan yang ada mengenai preferensi pengambil keputusan masa depan dan cara sumber daya maupun sarana ekonomi dapat dipindahkan sepanjang waktu. Sejumlah studi menunjukkan bahwa memasukkan aspek antargenerasi dapat menghasilkan perubahan yang signifikan pada keputusan optimal.

Secara praktis, penerapan Persamaan (13.21) dapat menghasilkan keputusan desain, inspeksi, dan pemeliharaan yang sama dengan keputusan yang diperoleh dari formulasi sebelumnya bila tingkat bunga yang dipakai hanya mencerminkan pertumbuhan ekonomi masyarakat - pada masa kini sekitar 2% per tahun. Untuk pengambilan keputusan berkelanjutan yang konsisten, tingkat bunga ini seharusnya diterapkan pada seluruh manfaat dan investasi dalam proyek rekayasa, termasuk yang terkait dengan aktivitas penyelamatan jiwa.

Hasil ini penting karena sejalan dengan berbagai temuan dalam ilmu ekonomi. Selain itu, hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan tingkat bunga yang mungkin teramati untuk berbagai jenis investasi, serta pentingnya pilihan fungsi diskonto, menjadi semakin kecil bahkan tidak terlalu penting bila keputusan dilihat dari perspektif jangka panjang.

Akhir dari Kuliah 13.

Terjemahan Bahasa Indonesia

Kuliah ke-13: Penerimaan Risiko dan Keselamatan Jiwa dalam Pengambilan Keputusan

Disusun berdasarkan seluruh halaman yang dilampirkan, secara berurutan dari awal sampai akhir lampiran.

Tujuan kuliah ini

Kuliah ini membahas penentuan prioritas berbagai kemungkinan investasi sosial dengan tujuan menyelamatkan nyawa manusia. Permasalahan ini menyentuh tatanan moral dasar masyarakat, dan penyelesaiannya menuntut agar nilai-nilai fundamental yang menjadi dasar masyarakat diperhitungkan secara semestinya. Mula-mula dibahas persoalan nilai-nilai dasar masyarakat menurut Piagam PBB tentang Hak Asasi Manusia. Setelah itu, preferensi dibahas dengan meninjau kemungkinan perbedaan antara preferensi individu dan preferensi masyarakat. Berdasarkan hal tersebut, ditegaskan bahwa dalam pengambilan keputusan rekayasa diperlukan perspektif normatif untuk menangani preferensi dan proses pengambilan keputusan. Selanjutnya disajikan format-format umum untuk mempresentasikan hasil penilaian risiko dan untuk memverifikasi penerimaan risiko. Dijelaskan bahwa dasar dari format-format tradisional ini sering bertumpu pada pengalaman dan penilaian para ahli, dan pada umumnya belum memiliki filosofi yang berlaku umum dan konsisten. Setelah itu dibahas risiko kehidupan sebagaimana dialami oleh manusia dan risiko yang terkait dengan berbagai aktivitas usaha di bidang rekayasa. Diamati bahwa risiko-risiko yang dialami di masa lalu belum tentu mencerminkan penanganan yang terarah terhadap risiko masyarakat. Berangkat dari titik ini diperkenalkan konsep baru yang disebut Life Quality Index (LQI), dan atas dasar itu ditunjukkan bagaimana kriteria penerimaan risiko keselamatan jiwa dapat diturunkan, serta bagaimana biaya kompensasi yang dimasukkan ke dalam optimasi alternatif keputusan dapat diturunkan. Terakhir, disajikan beberapa pertimbangan mutakhir mengenai bagaimana menghasilkan keputusan yang berkelanjutan dalam rekayasa, serta ditunjukkan bagaimana fungsi utilitas dapat dirumuskan dan diterapkan untuk mendukung keputusan sosial-ekonomi yang berkelanjutan.

Berdasarkan materi yang diperkenalkan dalam kuliah ini, mahasiswa diharapkan memperoleh pengetahuan dan keterampilan mengenai:

- Apa saja landasan nilai dasar masyarakat terkait prioritas penyelamatan jiwa?
- Apa implikasi Piagam PBB tentang hak asasi manusia terhadap pengambilan keputusan rekayasa?
- Bagaimana preferensi pribadi dan preferensi masyarakat dapat berbeda, dan bagaimana hal itu diperhitungkan dalam pengambilan keputusan rekayasa?
- Apa saja format tradisional untuk keterterimaan risiko dan apa kelemahannya?
- Apa yang dapat dipelajari dari penilaian statistik risiko berdasarkan pengalaman masa lalu?
- Apa itu LQI dan konstanta demografis apa saja yang memengaruhinya?
- Bagaimana kriteria Societal Willingness To Pay (SWTP) berhubungan dengan LQI?
- Bagaimana kriteria SWTP berhubungan dengan penilaian probabilitas kegagalan struktur yang dapat diterima?
- Bagaimana biaya kompensasi dapat dinilai dan dimasukkan ke dalam optimasi keputusan?

13.1 Pendahuluan

Dalam bab-bab sebelumnya, aspek-aspek mendasar tentang risiko dan keandalan dalam teknik sipil telah dibahas. Dimulai dengan gambaran umum mengenai insiden dan kegagalan yang pernah terjadi di

masa lalu, kemudian dibahas secara rinci bagaimana keandalan dan/atau risiko yang terkait dengan kegiatan rekayasa dapat dinilai dan dikendalikan secara kuantitatif dan konsisten. Untuk tujuan tersebut, dengan berlandaskan teori probabilitas dan analisis statistik Bayesian, mula-mula diperkenalkan alat-alat klasik untuk analisis pohon logika serta analisis keandalan klasik komponen teknis. Setelah itu diperkenalkan teori keandalan struktur, konsep serta alat untuk analisis keputusan Bayesian, dan akhirnya dibahas beberapa penerapan utama di bidang keandalan struktur.

Namun demikian, masih ada satu persoalan yang belum disentuh secara rinci meskipun memiliki peran penting dalam kerangka permasalahan, yaitu pertanyaan “seberapa aman itu cukup aman”, yakni persyaratan apa yang harus dipenuhi terkait keselamatan pada aktivitas yang dianalisis, dan prinsip-prinsip fundamental apa yang perlu diperhatikan ketika menilai keterterimaan risiko.

Landasan nilai dasar masyarakat

Sebelum masuk ke kompleksitas persoalan ini, penting untuk menyadari bahwa masalah tersebut memiliki dimensi mendasar dan filosofis yang berkaitan dengan hak-hak manusia. Kantor Komisaris Tinggi Hak Asasi Manusia Perserikatan Bangsa-Bangsa mengatur hak-hak manusia melalui “Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia”. Teks lengkapnya dapat ditemukan pada laman PBB, namun di sini tiga pasal yang relevan diberikan untuk memudahkan acuan.

Pasal 1

Semua manusia dilahirkan merdeka dan setara dalam martabat serta hak. Mereka dianugerahi akal dan hati nurani, dan hendaknya bertindak satu sama lain dalam semangat persaudaraan.

Pasal 3

Setiap orang berhak atas kehidupan, kebebasan, dan keamanan diri.

Pasal 7

Semua orang sama di hadapan hukum dan berhak, tanpa diskriminasi apa pun, atas perlindungan hukum yang sama. Semua orang berhak atas perlindungan yang sama terhadap segala bentuk diskriminasi yang melanggar Deklarasi ini dan terhadap segala hasutan menuju diskriminasi tersebut.

Pasal-pasal tersebut menegaskan kewajiban moral dan yuridis untuk memandang semua orang sebagai setara, serta menekankan hak atas keselamatan pribadi bagi setiap individu. Karena itu, apa pun kriteria yang dirumuskan terkait risiko yang dapat diterima, harus selalu diingat bahwa prinsip-prinsip dasar hak asasi manusia di atas tidak boleh dilanggar.

Dari sudut pandang filosofis, nilai setiap kehidupan - tanpa memandang usia, ras, atau jenis kelamin - adalah tak terhingga; dalam hal ini sebagian besar individu di masyarakat dapat sepakat, dan hal itu akan dianggap sebagai fakta dasar untuk pembahasan selanjutnya.

Namun keselamatan memiliki biaya - sebagaimana telah diketahui dan akan dibahas berikutnya - sehingga tingkat keselamatan yang hendak dijamin bagi anggota masyarakat merupakan keputusan sosial yang sangat dipengaruhi oleh kemampuan masyarakat untuk membiayainya. Meskipun masyarakat memandang nilai setiap individu sebagai tak terhingga, sumber daya yang dimiliki masyarakat terbatas sehingga prioritas harus ditetapkan. Setiap pengambil keputusan yang mewakili masyarakat atau sebagian masyarakat memiliki kondisi batas atau keterbatasan tertentu terhadap keputusan yang dapat ia ambil. Namun, dengan merujuk pada “Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia”, wakil-wakil masyarakat memiliki kewajiban moral umum untuk mempertimbangkan semua investasi dan pengeluaran dalam terang pertanyaan: “apakah sumber daya tersebut dapat dibelanjakan dengan lebih baik” demi memenuhi tujuan deklarasi tersebut.

Preferensi dalam pengambilan keputusan

Ketika membahas persoalan “risiko yang dapat diterima”, pembahasan sering menjadi kabur karena beberapa individu mungkin memiliki pandangan berbeda tentang apa yang dapat diterima dibandingkan dengan pandangan masyarakat. Setiap individu memiliki persepsi risikonya sendiri, atau dalam istilah teori keputusan, preferensinya sendiri. Dalam mempertimbangkan keterterimaan aktivitas yang berkaitan dengan teknik sipil atau aktivitas lain yang mungkin berdampak pada pihak ketiga, pertanyaan utamanya bukanlah preferensi anggota masyarakat secara individual, melainkan preferensi masyarakat sebagaimana dinyatakan dalam “Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia” atau kesepakatan umum lain yang sejenis. Preferensi individu pada kenyataannya dapat bertentangan secara tajam dengan preferensi masyarakat, sehingga perlu melihat keterterimaan dari sudut pandang masyarakat, sambil tetap memastikan bahwa hak-hak dasar individu tetap terlindungi. Hal ini menuntut pendekatan normatif dalam pemodelan preferensi dan dalam identifikasi kriteria penerimaan risiko.

Penting untuk memahami perbedaannya. Sebagaimana dapat disadari banyak orang dari pengalamannya sendiri, persoalan seberapa besar risiko yang dapat diterima merupakan isu yang sangat subjektif - bergantung pada preferensi individu. Preferensi individu bergantung pada situasinya (status sosial, kekayaan, pendidikan, keluarga, dan sebagainya). Contoh klasik yang menggambarkan hal ini berkaitan dengan risiko yang tidak diterima para pilot tempur Inggris pada Perang Dunia Kedua. Pada suatu tahap perang, sekelompok pilot menolak menjalankan misi karena tingkat kegagalan mesin yang relatif tinggi dan menyebabkan “kecelakaan”. Hal ini sendiri tidaklah aneh, namun ketika dilihat bahwa penyebab kematian para pilot akibat pertempuran udara aktif lima kali lebih sering daripada akibat kegagalan mesin, maka jelas bahwa preferensi pribadi memang sangat individual. Pembahasan lengkap tentang preferensi merupakan persoalan yang sangat filosofis dan berada di luar cakupan teks ini. Pembaca yang berminat dapat merujuk pada Harsanyi (1992) untuk pembahasan yang lebih rinci. Secara umum dapat dikatakan bahwa preferensi dapat dinilai berdasarkan berbagai jenis informasi.

Kuesioner atau wawancara dapat memberikan apa yang umum disebut sebagai preferensi yang dinyatakan. Analisis statistik terkait penyebab kematian pada berbagai jenis aktivitas maupun studi perilaku dapat memberikan apa yang umum disebut sebagai preferensi yang terungkap. Terakhir, preferensi yang dinyatakan berdasarkan pemahaman penuh terhadap konsekuensi yang mungkin timbul disebut sebagai preferensi yang terinformasi. Banyak teknik khusus telah dikembangkan untuk menilai dan memodelkan preferensi individu. Preferensi yang dinyatakan terbukti sangat bermasalah, karena dapat bergantung sepenuhnya pada cara informasi dikumpulkan, misalnya pada rumusan pertanyaan dalam wawancara. Preferensi yang terungkap memberikan dasar yang jauh lebih baik untuk memahami dan memodelkan preferensi, tetapi tidak ada jaminan bahwa preferensi tersebut akan memenuhi prasyarat mendasar seperti Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia. Preferensi terinformasi pada umumnya lebih disukai sebagai dasar pemodelan preferensi; namun demikian, jenis ini pun tidak lepas dari masalah. Tidak selalu mungkin menyampaikan informasi secara netral tentang konsekuensi yang akan mengikuti suatu preferensi tertentu, dan cara penjelasan konsekuensi tersebut juga dapat sangat memengaruhi preferensi terinformasi. Dalam konteks pengambilan keputusan sosial, tidak diragukan lagi bahwa preferensi terinformasi harus diupayakan. Peran insinyur dalam hal ini adalah membantu menyediakan informasi kepada para pengambil keputusan sosial seperti politisi dan otoritas mengenai risiko serta efisiensi berbagai pilihan pengelolaan risiko. Selain itu, tugas penting lainnya adalah mengomunikasikan dengan jelas kepada para pengambil keputusan sosial dan masyarakat umum asumsi-asumsi yang mendasari hasil-hasil risiko, serta implikasi dari asumsi tersebut terhadap pilihan keputusan optimal yang teridentifikasi. Jika semua aspek pengelolaan risiko sosial dikomunikasikan secara tepat, maka mekanisme demokrasi yang berfungsi baik seharusnya dapat menjadi dasar untuk menghadirkan preferensi terinformasi ke dalam proses pengambilan keputusan sosial.

Selanjutnya, mula-mula diringkas format-format yang umum diterapkan untuk menetapkan risiko keselamatan jiwa yang dapat diterima dalam rekayasa. Setelah itu dibahas aspek risiko yang terungkap

bagi individu dalam masyarakat, dan diperlihatkan bahwa indikasi risiko keselamatan jiwa yang dapat diterima dapat diperoleh hanya berdasarkan informasi statistik. Setelahnya, masalah penerimaan risiko ditinjau dari perspektif sosial atau sosial-ekonomi, dan diperlihatkan bahwa dimungkinkan untuk mengembangkan dasar yang lebih kaya dan lebih informatif bagi keputusan investasi sosial yang optimal untuk keselamatan jiwa.

13.2 Format Umum yang Diterapkan untuk Penerimaan Risiko

Format yang paling umum digunakan untuk merepresentasikan risiko yang dapat diterima adalah apa yang disebut diagram Farmer atau diagram F-N.

Gambar 13.1. Diagram Farmer (atau diagram F-N) dengan penunjukan risiko yang dapat diterima, zona ALARP, dan risiko yang tidak dapat diterima.

Pada sumbu-x ditampilkan konsekuensi, biasanya dalam bentuk jumlah korban jiwa, namun pada prinsipnya jenis konsekuensi lain pun dapat dipertimbangkan. Pada sumbu-y ditampilkan probabilitas terjadinya peristiwa yang bersangkutan. Diagram Farmer dapat digunakan untuk menggambarkan profil risiko suatu aktivitas tertentu atau jenis bahaya tertentu. Dengan cara ini, misalnya, profil risiko untuk berbagai jenis bahaya alam dapat dibandingkan pada tingkat nasional maupun regional. Namun, dalam perbandingan semacam itu, masalah ketergantungan terhadap skala harus diperhitungkan, karena probabilitas kejadian akan bergantung pada luas wilayah yang dipertimbangkan serta horizon waktu aktivitas yang ditinjau.

Berbagai varian diagram Farmer, misalnya matriks risiko, telah dikembangkan di berbagai bidang penerapan. Ciri umumnya adalah sama-sama menggambarkan hubungan antara konsekuensi dan probabilitas kejadian yang menimbulkan konsekuensi. Biasanya matriks risiko didefinisikan dengan konsekuensi dan probabilitas yang dinyatakan dalam rentang atau bahkan dalam istilah linguistik yang sepenuhnya subjektif.

Gambar 13.2. Matriks risiko dengan penunjukan area yang dapat diterima (hijau), ALARP (kuning), dan tidak dapat diterima (merah).

Representasi khas risiko yang dapat diterima diberikan melalui diagram Farmer pada Gambar 13.1 dan matriks risiko pada Gambar 13.2. Pada diagram, dua garis ditetapkan: garis atas mendefinisikan aktivitas-aktivitas yang dalam keadaan apa pun tidak dapat diterima, sedangkan garis bawah mendefinisikan aktivitas-aktivitas yang dalam semua keadaan dapat diterima. Wilayah di antara keduanya - yang disebut area abu-abu - mendefinisikan aktivitas yang masih diinginkan untuk mengalami pengurangan risiko. Dalam BUWAL (1991), diagram Farmer disediakan untuk berbagai indikator konsekuensi, misalnya hilangnya nyawa, pelepasan zat beracun, dan sebagainya. Area dapat diterima dan tidak dapat diterima berbeda-beda untuk setiap indikator konsekuensi.

Diagram Farmer banyak digunakan ketika mendefinisikan dan mendokumentasikan risiko yang dapat diterima. Untuk aktivitas yang berada di antara area dapat diterima dan tidak dapat diterima, filosofi yang umum dipakai adalah menerapkan langkah pengurangan risiko berdasarkan pertimbangan efisiensi biaya. Prinsip yang lazim digunakan untuk hal ini adalah As Low As Reasonably Practicable (ALARP). Maknanya sederhana: pengurangan risiko di area ini harus dilakukan selama biaya pengurangan risiko tersebut tidak terlalu tidak sebanding dibandingkan efek pengurangan risikonya.

Meskipun sederhana dalam penggunaan, diagram Farmer juga memiliki sifat yang kurang menguntungkan bila diterapkan untuk memvalidasi penerimaan risiko suatu aktivitas tertentu. Kelemahannya adalah diagram ini tidak konsisten terhadap risiko total. Untuk menjelaskannya, pada Gambar 13.1 telah digambarkan tiga kurva bertangga yang mewakili profil risiko untuk tiga aktivitas tertentu, misalnya proyek rekayasa. Terlihat bahwa dua dari kurva bertangga tersebut berada di bawah garis penerimaan dan karena itu keduanya langsung dapat diterima. Kurva ketiga, sebaliknya, pada

prinsipnya tidak dapat langsung diterima karena masuk ke zona abu-abu. Namun ketika risiko total yang terkait dengan masing-masing aktivitas dievaluasi, terlihat bahwa risiko total pada aktivitas yang langsung dapat diterima justru lebih rendah daripada risiko pada aktivitas yang tidak dapat langsung diterima. Karena alasan ini, patut dipertanyakan apakah diagram Farmer diterapkan secara tepat dalam praktik.

Di dalam industri lepas pantai, format lain untuk kriteria penerimaan yang berkaitan dengan keselamatan jiwa juga digunakan, yakni Fatal Accident Rate (FAR).

Fatal Accident Rate (FAR) didefinisikan sebagai:

$$FAR = PLL \times 10^8 / (N_p \times H_p)$$

dengan N_p adalah jumlah orang pada suatu fasilitas lepas pantai tertentu dan H_p adalah jumlah jam paparan per tahun. Jika semua orang di fasilitas tersebut bekerja dan tinggal di sana, maka $H_p = 365 \times 24 = 8760$ jam/tahun. PLL (Potential Loss of Lives) adalah jumlah fatalitas yang diharapkan per tahun. Jika peristiwa kehilangan total fasilitas dipertimbangkan dengan probabilitas kejadian tahunan P_F , dan diasumsikan semua orang akan meninggal, maka PLL diberikan oleh:

$$PLL = P_F \times N_p$$

Rentang FAR yang secara tipikal dapat diterima berada pada interval 10-15.

13.3 Risiko yang Terungkap dalam Masyarakat

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan berbagai format untuk menetapkan risiko yang dapat diterima. Keputusan atau penilaian mengenai keterterimaan sering kali dibuat oleh para ahli dan didukung oleh berbagai studi biaya-manfaat serta perbandingan dengan praktik di masa lalu. Sampai belum lama ini, pendekatan yang dominan adalah menggunakan risiko-risiko yang dialami dan tampaknya diterima di masa lalu sebagai pedoman dalam membuat keputusan tentang risiko yang akan diterima di masa depan. Berikut ini mula-mula dibahas risiko kehidupan, kemudian risiko dalam konteks yang lebih luas.

Risiko keselamatan jiwa yang dialami

Dengan meninjau angka risiko kematian per 100.000 orang per tahun pada Tabel 13.1 (diadaptasi dari Schneider, 1994; lihat juga tabel sejenis pada Kuliah 1), dapat diperoleh gambaran mengenai orde besaran risiko kehidupan yang dialami di masa lalu.

Kategori	Tingkat risiko	Contoh aktivitas/pekerjaan
Rata-rata semua sebab	110	Setara sekitar usia 25 tahun
Rata-rata semua sebab	100	Setara sekitar usia 35 tahun
Rata-rata semua sebab	300	Setara sekitar usia 45 tahun
Rata-rata semua sebab	800	Setara sekitar usia 55 tahun
Rata-rata semua sebab	2000	Setara sekitar usia 65 tahun
Rata-rata semua sebab	5000	Setara sekitar usia 75 tahun
Tingkat kematian pekerjaan	100	Penebang kayu dan transportasi kayu
Tingkat kematian pekerjaan	90	Kehutanan
Tingkat kematian pekerjaan	50	Pekerjaan konstruksi
Tingkat kematian pekerjaan	15	Industri kimia
Tingkat kematian pekerjaan	10	Produksi mekanik
Tingkat kematian pekerjaan	5	Pekerjaan kantor
Risiko lain-lain	400	20 batang rokok per hari
Risiko lain-lain	300	1 botol anggur per hari
Risiko lain-lain	150	Mengendarai motor
Risiko lain-lain	100	Gantung layang
Risiko lain-lain	20	Mengemudi mobil (usia 20-24 tahun)
Risiko lain-lain	10	Pejalan kaki (rumah tangga)

Kategori	Tingkat risiko	Contoh aktivitas/pekerjaan
Risiko lain-lain	10	10.000 km perjalanan mobil
Risiko lain-lain	5	Pendakian gunung
Risiko lain-lain	3	10.000 km transportasi jalan raya
Risiko lain-lain	1	Kecelakaan pesawat (per perjalanan)
Risiko lain-lain	1	Kebakaran di bangunan
Risiko lain-lain	1	10.000 km perjalanan kereta api
Risiko lain-lain	0,2	Kematian akibat gempa bumi (California)
Risiko lain-lain	0,1	Kematian akibat petir

Tabel 13.1. Laju kematian per 100.000 orang per tahun untuk berbagai pekerjaan dan aktivitas.

Dari Tabel 13.1 terlihat bahwa laju kematian sangat bervariasi di antara berbagai jenis pekerjaan. Jelas bahwa setiap rumah tangga memerlukan pendapatan, dan kriteria penerimaan yang diatur oleh masyarakat pada tingkat tertentu bertujuan melindungi individu dari eksploitasi oleh pihak ketiga yang timbul dari kondisi mereka dan preferensi pribadi yang mengikutinya.

Dengan mempelajari angka-angka dalam tabel, dapat pula dikenali adanya ketergantungan antara tingkat risiko yang tampaknya diterima oleh individu, derajat kesukarelaan aktivitas, dan derajat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan aktivitas tersebut. Sebagai contoh, dapat dipertimbangkan tingginya tingkat risiko kematian yang terkait dengan mengendarai motor. Aktivitas ini jelas dilakukan secara sukarela dan pengendaranya dianggap memiliki perasaan kuat bahwa ia mengendalikan keadaan. Di sisi lain, diamati bahwa risiko pekerjaan pada umumnya jauh lebih kecil bagi sebagian besar orang. Keterkaitan antara derajat kesukarelaan dan risiko yang secara inheren diterima dapat digambarkan sebagaimana pada Gambar 13.3.

Gambar 13.3. Ilustrasi hubungan antara derajat kesukarelaan, derajat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan suatu aktivitas, dan jenis aktivitas yang diterima oleh individu.

Gambar 13.4. Ilustrasi hubungan antara derajat kesukarelaan, derajat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan suatu aktivitas, dan tingkat kuantitatif risiko yang tampaknya diterima oleh individu. Angka-angka pada gambar harus dikalikan dengan 10^{-5} .

Berdasarkan pengalaman, misalnya sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 13.1 dan dari sumber informasi lainnya, aktivitas yang tercantum pada Gambar 13.3 dapat dikaitkan dengan probabilitas kematian sehingga diperoleh gradasi kuantitatif risiko yang dapat diterima bagi individu sebagai fungsi dari derajat kesukarelaan dan derajat pengaruh pribadi terhadap keberhasilan aktivitas tersebut. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 13.4.

Menarik untuk mencermati lebih dekat Gambar 13.3 dan Gambar 13.4. Di sudut kiri atas gambar-gambar tersebut, aktivitas benar-benar bersifat individual - terdapat derajat kesukarelaan yang tinggi dan derajat pengaruh pribadi yang tinggi terhadap keberhasilan aktivitas. Di sudut kiri bawah, sebaliknya, aktivitas sebenarnya tidak benar-benar individual - tidak bersifat sukarela dan keberhasilan aktivitas tidak dikendalikan oleh individu yang terlibat. Untuk jenis aktivitas semacam ini, masyarakat berkewajiban melindungi individu sesuai dengan “Deklarasi Universal Hak Asasi Manusia”. Dari Gambar 13.4 tampak bahwa nilai pada orde 10^{-5} mungkin mendekati nilai yang secara umum dapat diterima. Namun, pada bagian berikut akan diperlihatkan bahwa dimungkinkan untuk menetapkan dasar penilaian yang lebih halus untuk hal ini.

Risiko yang dialami dalam aktivitas komersial terpilih

Pada diagram Farmer yang ditunjukkan pada Gambar 13.1, frekuensi yang diamati dan kerugian yang bersesuaian telah diplot untuk peristiwa kegagalan di sektor lepas pantai, maritim, pertambangan, penerbangan, dan energi air.

Gambar 13.5. Diagram Farmer dengan penunjukan risiko-risiko yang dialami pada berbagai aktivitas sosial di masa lalu.

Dengan memplotkan ke dalam diagram kriteria penerimaan risiko yang tipikal, terlihat bahwa tidak semua risiko berada pada wilayah yang dapat diterima. Juga terlihat adanya variasi besar pada risiko yang dialami antar sektor. Salah satu contoh sektor dengan risiko yang dialami sangat kecil adalah sektor penerbangan. Situasi yang berlawanan dapat ditemukan pada sektor pelayaran niaga. Hal ini dapat memiliki berbagai penjelasan - salah satunya bahwa risiko yang diamati hanya menunjukkan kerugian, bukan peluang atau keuntungan yang terkait dengan aktivitas tersebut. Dalam pelayaran niaga maupun eksplorasi minyak dan gas, potensi keuntungan sangat besar, dan meskipun ada kerugian yang dialami, manfaat yang diperoleh tetap mungkin sangat besar. Pada sektor penerbangan komersial, sebaliknya, pendapatan diperoleh berdasarkan kepercayaan pelanggan terhadap keselamatan yang diberikan oleh masing-masing maskapai. Tampaknya keselamatan aktual yang diberikan pada berbagai aktivitas sosial sedikit banyak digerakkan oleh mekanisme pasar yang mendasarinya, dan hanya sebagian oleh pengelolaan yang adil.

13.4 Penyelamatan Jiwa - dan Kinerja Masyarakat

Menyelamatkan nyawa dalam masyarakat, sebagaimana telah beberapa kali disoroti, merupakan tanggung jawab para pengambil keputusan sosial. Insinyur, bersama sejumlah profesi lainnya, menyediakan dukungan keputusan bagi para pengambil keputusan sosial tentang bagaimana aktivitas penyelamatan jiwa dapat dilakukan dengan cara yang paling efisien. Jelas bahwa para profesional di sektor kesehatan seperti dokter, perawat, dan peneliti secara umum jauh lebih langsung terlibat dalam aktivitas penyelamatan jiwa dibandingkan insinyur. Namun ada banyak profesi lain yang memiliki agenda dasar yang sama. Dalam Tabel 13.2 ditunjukkan bahwa efisiensi terkait penyelamatan jiwa sangat bergantung pada sektor dan jenis aktivitas yang dipertimbangkan.

Biaya reduksi risiko (SFr per jiwa terselamatkan)	Aktivitas
100	Vaksinasi massal - dunia ketiga
1×10^3	Fasilitas sinar-X medis
2×10^3	Memakai helm sepeda motor
5×10^3	Ambulans jantung
10×10^3	Layanan helikopter darurat
20×10^3	Sabuk pengaman pada mobil
100×10^3 hingga 500×10^3	Restrukturisasi persimpangan; dialisis ginjal; keandalan struktur
1×10^6	
2×10^6	
5×10^6	Kereta kota Zurich, Alp Transit
10×10^6	Standar gempa SIA
20×10^6	Keselamatan tambang USA
50×10^6	DC-10 tidak dioperasikan
100×10^6	Peraturan bangunan bertingkat banyak
1×10^9	Penghilangan asbes dari bangunan publik

Tabel 13.2. Biaya reduksi risiko (SFr per jiwa terselamatkan), Schneider (1994).

Dari Tabel 13.2 terlihat bahwa terdapat perbedaan yang sangat besar dalam efisiensi biaya dari berbagai langkah pengurangan risiko yang dapat diterapkan dengan tujuan menyelamatkan nyawa manusia. Tabel tersebut juga dengan jelas menunjukkan irasionalitas sebagian langkah yang pernah diambil di masa lalu, misalnya penggantian material bangunan yang mengandung asbes di sekolah dan bangunan umum pada tahun 1990-an. Sumber daya ekonomi yang digunakan untuk menyelamatkan satu orang

melalui langkah ekstrem ini mungkin dapat menyelamatkan 10 juta orang di dunia ketiga seandainya uang tersebut dibelanjakan untuk vaksinasi massal.

Pada tingkat pengambilan keputusan sosial tertinggi, persoalan besarnya adalah bagaimana memprioritaskan investasi ke berbagai sektor sosial, misalnya sektor kesehatan, sektor transportasi umum, sektor infrastruktur masyarakat, sektor energi, dan lain-lain. Jelas bahwa keputusan semacam itu tidak dapat hanya berfokus pada keselamatan individu dalam masyarakat, tetapi juga harus mempertimbangkan perkembangan umum masyarakat dan faktor-faktor lain yang memengaruhi kualitas hidup individu. Ini adalah persoalan kompleks yang melibatkan banyak aspek seperti ketersediaan sumber daya alam, produksi yang efektif, stabilitas sosial, serta batas-batas lingkungan. Pada Gambar 13.6 diberikan sketsa yang menunjukkan keterkaitan kompleks dalam masyarakat, yang pada akhirnya mengatur kondisi yang harus dihadapi oleh individu-individu dalam masyarakat.

Gambar 13.6. Ilustrasi keterkaitan aktivitas-aktivitas sosial yang memengaruhi kualitas hidup individu dalam masyarakat.

Kinerja berbagai masyarakat di dunia dinilai dan dipantau oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa. Indeks yang paling luas digunakan untuk menilai perkembangan di berbagai negara disebut Human Development Index (HDI). Namun terdapat banyak indeks lain yang masing-masing menunjukkan karakteristik perkembangan tertentu pada suatu negara.

Menurut unstats.un.org, HDI dihitung sebagai rata-rata dari tiga indeks demografis lain, yaitu Gross Domestic Product (GDP) Index, Education Index (EI), dan Life Expectancy Index (LEI), yaitu:

$$\text{HDI} = (1/3) \text{ GDP Index} + (1/3) \text{ EI} + (1/3) \text{ LEI}$$

GDP Index dihitung sebagai:

$$\text{GDP Index} = [\log(\text{GDP_PC}) - \log(100)] / [\log(40000) - \log(100)]$$

di mana GDP_PC adalah GDP per kapita yang disesuaikan dengan purchasing power parity dalam dolar AS pada suatu negara. Dalam Persamaan (13.4), $\log(40000)$ dan $\log(100)$ merepresentasikan logaritma dari GDP_PC tertinggi dan terendah untuk negara-negara yang dinilai.

Education Index (EI) dinilai sebagai:

$$\text{EI} = (2/3) \text{ ALI} + (1/3) \text{ GEI}$$

dengan Adult Literacy Index (ALI) dihitung sebagai:

$$\text{ALI} = (\text{ALR} - 0) / (100 - 0)$$

di mana ALR adalah Adult Literacy Rate pada suatu negara. Gross Enrolment Index (GEI) adalah indikator berapa banyak calon murid potensial di suatu negara yang benar-benar terdaftar sebagai murid. Sering kali dipakai indeks gabungan yang dirata-ratakan atas berbagai tingkat pendidikan dalam suatu negara (biasanya tiga tingkat). GEI dihitung sebagai:

$$\text{GEI} = (\text{GER} - 0) / (100 - 0)$$

dengan GER adalah Gross Enrolment Ratio gabungan.

Terakhir, Life Expectancy Index (LEI) dihitung sebagai:

$$\text{LEI} = (\text{LE} - 25) / (85 - 25)$$

di mana LE adalah harapan hidup saat lahir (dalam tahun). Angka 85 dan 25 merepresentasikan harapan hidup tertinggi dan terendah yang dimungkinkan pada saat ini. PBB menerbitkan HDI untuk masing-masing negara setiap tahun. Pada Gambar 13.7 diperlihatkan pemetaan HDI dunia untuk tahun 2004.

Gambar 13.7. Ilustrasi HDI untuk negara-negara di dunia.

Dari Gambar 13.7 diperoleh gambaran umum yang memungkinkan perbandingan kinerja umum berbagai negara. Namun, terlepas dari banyak kelebihan HDI sebagai dasar perbandingan, masih ada beberapa aspek perkembangan sosial yang tidak terwakili. Salah satunya adalah bagaimana pendapatan

suatu negara didistribusikan di antara penduduknya. Untuk menggambarkan hal ini, indeks Gini dapat digunakan. Pada Gambar 13.8, indeks Gini dipetakan untuk seluruh dunia pada tahun 2004. Jika pendapatan terdistribusi sepenuhnya merata, maka indeks Gini akan bernilai nol.

Gambar 13.8. Ilustrasi distribusi pendapatan (indeks Gini) untuk berbagai negara di dunia.

Dalam Kuliah 1, perkembangan GDP per kapita dan harapan hidup saat lahir telah dibahas, dan ditunjukkan bahwa untuk Swiss indikator-indikator demografis tersebut telah berkembang sangat signifikan selama 100 tahun terakhir. Perkembangan ini bukanlah sesuatu yang khusus bagi Swiss, melainkan khas bagi semua negara yang berkembang di bawah kapitalisme demokratis. Perubahan semacam itu dapat dihubungkan dengan banyak perubahan di masyarakat. Harapan hidup saat lahir secara implisit mencerminkan perubahan besar dalam cara orang hidup, kualitas perumahan, sistem sanitasi, ketersediaan dan mutu pangan, pendidikan kesehatan umum, serta capaian riset dan perbaikan umum dalam sektor medis. Semua capaian ini dimungkinkan oleh perkembangan paralel kemampuan ekonomi masyarakat. Perkembangan GDP juga mencakup berbagai efek, dan diyakini berkaitan kuat dengan harapan hidup, dalam arti bahwa kenaikan besar harapan hidup menjelang akhir abad ke-19 memfasilitasi pendidikan dan pengembangan angkatan kerja yang pada gilirannya memfasilitasi apa yang lazim disebut industrialisasi. Dengan demikian terlihat bahwa harapan hidup dan GDP menangkap banyak faktor di luar sekadar uang dan tahun, dan dapat dipandang sebagai deskriptor yang kuat terhadap perkembangan masyarakat. Dimasukkannya Education Index sebagai bagian dari HDI memang relevan untuk menunjukkan peluang-peluang yang belum dimanfaatkan oleh berbagai negara guna meningkatkan perkembangannya; namun secara implisit aspek pendidikan sebenarnya sudah tercakup dalam LEI dan GDP Index.

Sebagaimana disebutkan sebelumnya, preferensi yang terungkap lebih disukai dibanding preferensi yang dinyatakan. Pada bagian selanjutnya akan diuraikan bagaimana, berdasarkan indikator-indikator demografis, preferensi terkait investasi untuk penyelamatan jiwa dapat disimpulkan.

13.5 Pemodelan Risiko yang Dapat Diterima secara Sosial-Ekonomi

Secara umum diterima bahwa keputusan mengenai perencanaan, perancangan, pelaksanaan, operasi, dan penghentian infrastruktur sosial harus didasarkan pada optimasi manfaat siklus hidup dengan menggunakan prinsip pengambilan keputusan dan penilaian risiko sebagaimana diuraikan dalam Kuliah 3 dan Kuliah 4. Namun, selain risiko akibat kerugian ekonomi, pengambil keputusan juga harus memperhitungkan risiko kematian dan cedera serta potensi kerusakan terhadap lingkungan.

Kriteria penerimaan risiko yang rasional dalam konteks pengambilan keputusan sosial dapat diturunkan atas dasar pertimbangan sosial-ekonomi. Faktanya, individu dalam masyarakat melakukan aktivitas yang berbahaya demi keuntungan ekonomi atau demi kesenangan dan aktualisasi diri. Sementara itu, dari sudut pandang sosial, jelas bahwa individu harus dilindungi dari eksploitasi oleh pihak ketiga; namun tidak jelas sampai sejauh mana risiko sukarela seharusnya diatur, sepanjang risiko tersebut tidak melibatkan pihak ketiga. Sebagai contoh, hampir tidak mungkin mengatur perilaku individu yang senang menghabiskan waktu di alam terbuka. Ini adalah persoalan hak asasi manusia yang mendasar: apakah masyarakat akan mengizinkan individu tersebut melakukan aktivitas yang berpotensi berbahaya, dan dalam kondisi apa. Cara persoalan-persoalan seperti ini diatur pada berbagai negara atau wilayah bergantung pada situasi politik. Dalam beberapa kasus, masyarakat mensyaratkan agar individu mengikuti pendidikan tertentu untuk memastikan bahwa mereka mampu melindungi diri melalui perilaku yang memadai; misalnya untuk pendakian gunung, berburu, dan menyelam. Dalam beberapa kasus lain, persyaratan tambahan seperti asuransi juga diwajibkan untuk melindungi individu itu sendiri maupun pihak ketiga yang mungkin terekspos akibat aktivitas tersebut. Dalam konteks saat ini, yakni pengambilan keputusan normatif, perspektif yang diambil adalah bahwa pengambilan keputusan sosial

terkait investasi keselamatan jiwa hanya berhubungan dengan risiko tak sukarela di ranah publik, sejauh menyangkut aktivitas yang terkait dengan fungsi-fungsi masyarakat.

Diasumsikan bahwa pengurangan risiko selalu terkait dengan realokasi sumber daya ekonomi masyarakat. Dalam konteks infrastruktur sosial yang masa layanannya biasanya berada pada orde puluhan hingga ratusan tahun, sangat penting agar sumber daya ekonomi semacam itu dialokasikan dengan efisiensi setinggi mungkin serta dengan mempertimbangkan keterterimaan antargenerasi.

Pada tingkat pengambilan keputusan sosial, suatu aktivitas penyelamatan jiwa yang efisien dapat dipahami sebagai suatu tindakan yang dengan cara paling hemat biaya mengurangi mortalitas atau, secara ekuivalen, meningkatkan harapan hidup statistik.

Life Quality Index

Pada dasarnya, satu-satunya aset yang tersedia bagi individu dalam masyarakat adalah waktu. Waktu dapat digunakan untuk kegiatan aktualisasi diri, tetapi juga dapat ditukar menjadi barang, dan nilai tukarnya bergantung pada nilai yang diberikan terhadap waktu. Pada prinsipnya, penilaian terhadap waktu bersifat subjektif karena bergantung pada kondisi hidup individu. Secara umum, semakin baik kondisi hidup, semakin tinggi nilai waktu, dan semakin disukai penggunaan waktu untuk kepentingan pribadi. Karena itu, suatu model kualitas hidup harus mempertimbangkan waktu yang tersedia untuk tujuan pribadi sekaligus kemampuan untuk menikmati waktu tersebut. Isu yang sesungguhnya di sini adalah waktu dalam keadaan sehat.

Peningkatan bertahap harapan hidup melalui pengurangan risiko, kerugian sumber daya ekonomi yang menyertainya - yang diukur melalui Gross National Product (GNP) - bersama dengan waktu yang digunakan untuk bekerja, semuanya dinilai bagi suatu kehidupan statistik dalam masyarakat tertentu, membentuk unsur-unsur terpenting dalam penilaian efisiensi langkah-langkah pengurangan risiko. Berdasarkan indikator-indikator demografis tersebut, Life Quality Index (LQI) memfasilitasi ...

[Catatan: teks pada lampiran berakhir di sini, sehingga terjemahan juga diakhiri pada bagian yang sama.]