PENYUSUNAN JADWAL KULIAH DI PERGURUAN TINGGI DENGAN METODE *TABU SEARCH* (PENCARIAN TERLARANG)

Oleh:
Sahid

Abstrak

Penelitian ini mengkaji masalah penyusunan jadwal kuliah di perguruan tinggi, yang menuntut agar sejumlah tatap muka mingguan [illegible] para dosen dan mahasiswa dijadwalkan pada sejumlah blok waktu dan ruang.

Suatu metode heuristik yang didasarkan pada algoritma *tabu search (pencarian terlarang)* diajukan untuk menyelesaikan masalah tersebut.

Hasil eksperimen dengan menggunakan data nyata menunjukkan bahwa metode tersebut dapat digunakan untuk menghasilkan jadwal tanpa ada mahasiswa atau dosen yang harus terlibat dalam dua kegiatan pada waktu yang sama dan tanpa ada kelas yang melebihi kapasitas ruang kuliah yang dijadwalkan.

---

1) *Artikel ini diangkat dari salah satu penelitian yang dilakukan oleh penulis dalam rangka penyusunan Tesis M.Sc. pada Departement of Mathematics, The University of Queensland, Australia, 1995-1997*

Pendahuluan

Berbagai masalah penjadwalan, termasuk penjadwalan di perguruan tinggi, dan metode penyelesaiannya telah dilaporkan di dalam literatur. Meskipun [illegible] bidang komputerisasi penyusunan jadwal telah dilakukan sejak [illegible], masalah tersebut masih tetap menarik perhatian para peneliti [illegible] keanekaragaman kendala antarinstitusi dan adanya kemungkinan [illegible] metode-metode optimisasi kombinatorial lain untuk masalah tersebut. Artikel ini menguraikan salah satu cara penyusunan jadwal kuliah dengan menggunakan suatu metode yang berdasarkan algoritma *tabu search* (pencarian terlarang).

Bagian 2 menjelaskan perumusan masalah penyusunan jadwal kuliah dalam bentuk pemrograman matematis (sebagai masalah optimisasi). Pada bagian 3 dijelaskan metode penyelesaian yang diajukan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Beberapa hasil eksperimen dengan menggunan data nyata diberikan pada bagian yang diikuti dengan kesimpulan dan perluasan pada bagian 5

Perumusan Masalah Penjadwalan Kuliah

Masalah penjadwalan kuliah yang dikaji di sini ialah bagaimana cara mengalokasikan sejumlah kegiatan kuliah pada sejumlah blok waktu dan ruang sedemikian sehingga tabrakan waktu yang berkaitan dengan mahasiswa, dosen, dan ruang atau tempat duduk dapat dihindari. Data masukan dalam penelitian ini terdiri atas sebuah daftar kelas, daftar mahasiswa, daftar blok waktu, dan daftar ruang yang tersedia. Setiap kelas terdiri atas sejumlah mahasiswa yang mengambil suatu mata kuliah dan seorang dosen yang mengajar mata kuliah tersebut. Nama suatu kelas adalah kombinasi dari kode mata kuliah dan sekelompok mahasiswa. Misalnya, kelas MA4241B adalah kelas dari kelompok B yang mengambil mata kuliah MA4241. Setiap blok waktu menyatakan suatu interval waktu (dan dengan demikian lamanya dalam menit) pada hari tertentu. Diantara dua blok waktu terdapat waktu selang. Tugas penyusun jadwal adalah menentukan banyaknya kegiatan kuliah (tatap muka mingguan) setiap kelas atau mata kuliah dan lamanya masing-masing kegiatan, kemudian mengalokasikan setiap kegiatan pada suatu blok waktu dan ruang.

Misalkan terdapat N kegiatan kuliah, dan setiap kegiatan i berlangsung selama $l(i)$ menit. Misalkan juga terdapat T blok waktu, dan lama blok waktu j adalah $d(j)$ menit. Banyaknya ruang yang tersedia adalah R, dan setiap ruang k mempunyai kapasitas $c(k)$ tempat duduk. Berikutnya, misalkan $m(p,q)$ adalah banyaknya mahasiswa yang mengambil kedua kuliah p maupun q, and $D(p,q)$ banyaknya dosen yang mengajar baik kuliah p maupun q. Dalam hal ini m dan D menyatakan tabrakan waktu antarkegiatan, yakni jika $m(p,q) > 0$ atau $D(p,q) > 0$ maka kedua p dan q tidak dapat dijadwalkan secara bersamaan. Selanjutnya, misalkan $x_{ijk}=1$ jika kegiatan i dijadwalkan pada blok waktu j di ruang k, dan $x_{ijk} = 0$ untuk kasus lain. Sekarang permasalahannya dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$f=\sum_{j=1}^{T}\sum_{\substack{p,q=1\\ p\neq q}}^{N}(\alpha . m(p,q)-\beta . D(p,q))\sum_{k=1}^{R}x_{pjk}\sum_{l=1}^{R}x_{qjl}$$

$$+\sum_{j=1}^{T}\sum_{k=1}^{R}\sum_{i=1}^{N}\psi(c(k)-M_i . x_{ijk}) \qquad (1)$$

dengan syarat:

$$\sum_{k=1}^{R}\sum_{j=1}^{T}x_{ijk}=1 \;(i=1,\dots,N), \qquad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{R}\sum_{i=1}^{N}x_{ijk}\le R_j \;(j=1,\dots,T), \qquad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N}x_{ijk}\le 1 \;(j=1,\dots,T;\ k=1,\dots,R), \qquad (4)$$

$$l(i).\,x_{ijk}\le d(j) \;(i=1,\dots,N;\ j=1,\dots,T;\ k=1,\dots,R), \qquad (5)$$

$$x_{ijk}\in\{0,1\} \;(i=1,\dots,N;\ j=1,\dots,T;\ k=1,\dots,R). \qquad (6)$$

dengan R_j menyatakan banyaknya ruang yang tersedia pada blok waktu j, ($R_j \le R$), M_i adalah banyaknya mahasiswa yang mengikuti kuliah i, dan fungsi $\psi(u)$ didefinisikan bernilai 1 jika $u < 0$ dan 0 jika $u \ge 0$.

Tujuan M1 adalah untuk menyusun suatu jadwal kuliah yang meminimumkan tabrakan waktu yang melibatkan mahasiswa, dosen, dan ruang dan yang memenuhi syarat-syarat tertentu. Komponen-komponen pada (1) dengan koefisien α, β, δ berturut-turut adalah banyaknya mahasiswa yang harus mengikuti dua kuliah sekaligus, banyaknya dosen yang harus mengajar dua kuliah sekaligus, dan banyaknya ruang yang dipakai untuk kuliah dengan jumlah mahasiswa lebih besar daripada kapasitas tempat duduknya.

Kendala (2) memaksa setiap kegiatan harus dijadwalkan sekali pada suatu blok waktu dan ruang tertentu. Kendala (3) menjamin bahwa banyaknya kegiatan yang terjadwal pada setiap blok waktu tidak melebihi banyaknya ruang yang tersedia pada saat itu. Apabila semua ruang tersedia setiap saat, maka nilai Rj pada (3) dapat diganti dengan nilai R. Kendala (4) membatasi banyaknya kegiatan yang dapat dijadwalkan secara bersamaan di setiap ruang paling banyak satu. Kendala (5) mensyaratkan setiap kegiatan dijadwalkan pada blok waktu yang lamanya tidak lebih pendek daripada lama kuliah tersebut. Yang terakhir, kendala (6) membatasi nilai-nilai variabel keputusan harus 0 atau 1.

Berbagai rumusan matematis dari masalah-masalah penjadwalan kuliah telah diberikan oleh beberapa peneliti (Aubin1 and Ferland, 1989; de Werra1985; Kiaer,1992; Mulvey, 1982, Schaerf, 1995; Tripathy 1980; Tripathy, 1992). Rumusan-rumusan yang diberikan oleh de Werra (1985), Kiaer and Yellen (1992) Schaerf (1995), Tripathy (1980), dan Tripathy (1992), hanya melibatkan pengalokasian kuliah ke blok waktu, tanpa memasukkan kendala tipe (5). Oleh karena rumusan-rumusan mereka tidak menyertakan pengalokasian ruang, mereka menghilangkan kendala kapasitas tempat duduk. Rumusan yang diberikan oleh Aubin (1989) menggunakan dua jenis variabel keputusan yang menyatakan pengalokasian mahasiswa ke kelas dan kegiatan kuliah ke waktu. Pengalokasian ruang ditangani secara implisit dengan mempartisi semua ruang yang tersedia menjadi beberapa kelompok yang masing-masing terdiri atas ruang-ruang yang bertipe sama dan menentukan jika dua kegiatan memerlukan tipe ruang yang sama. Kendala-kendala yang diikutsertakan terdiri atas pembatasan nilai-nilai variabel keputusan (tipe 6) dan persyaratan mengalokasikan mahasiswa pada subjek yang telah dipilihnya. Kendala-kendala lain dimasukkan sebagai komponen dalam fungsi objektif (yang menyertakan faktor kesenangan dosen terhadap waktu). Rumusan yang diberikan pada Mulvey (1982) meliputi pengalokasian kuliah ke *slot* (kombinasi ruang dan waktu). Setiap kelas dianggap dapat dijadwalkan pada sembarang waktu asalkan kendala-kendala yang ditentukan dipenuhi. Perbandingan singkat ini menunjukkan bahwa rumusan M1 berbeda dalam beberapa hal dengan rumusan-rumusan sebelumnya yang ditemukan di literatur.

Masalah penjadwalan termasuk dalam kelas masalah *NP*-lengkap. Hal ini dapat ditunjukkan dengan mereduksinya menjadi masalah pewarnaan graf (Carter1986, Cangalovic1991, Dewerra1985, Schaerf, 1995a). Even et al. (1976),

menentukan kompleksitas masalah penjadwalan yang terdiri atas pengalokasian kegiatan kuliah dan blok waktu 1-jam-an ke kelas, dengan diketahui waktu-waktu fisibel setiap dosen dan kelas dan banyaknya kuliah setiap kelas yang harus diberikan oleh seorang dosen. Mereka memilih suatu penjadwalan terbatas, dengan: 3 blok waktu, semua kelas dapat dijadwalkan kapan saja, setiap kelas perlu bertemu dengan seorang dosen paling banyak sekali selama 3 blok waktu tersebut, dan setiap dosen hanya dapat mengajar sebanyak jam mengajar yang diperlukan, yaitu 2 atau 3 jam. Untuk menunjukkan kompleksitas masalah penjadwalan terbatas demikian, mereka menunjukkan korespondensi antara masalah tersebut dengan 3-SAT, keterpenuhan bentuk normal konjungtif dengan 3 literal per klause, yang telah diketahui sebagai *NP*-lengkap. Selanjutnya mereka menyimpulkan bahwa semua masalah umum penjadwalan adalah mathcal *NP*-lengkap. Sebagai tambahan, mereka enunjukkan bahwa masalah penjadwalan terbatas tersebut dapat diselesaikan secara polinomial untuk kasus khusus yaitu kasus dengan setiap dosen dapat mengajar tepat dua kali.

Oleh karena kompleksitas masalah penjadwalan kuliah, para peneliti biasanya tidak menggunakan metode deterministik untuk menyelesaikan masalah tersebut. Sebagai alternatif, beberapa metode heuristik telah diajukan dan masalahnya dirumuskan sebagai masalah optimisasi dengan syarat-syarat fisibilitas dilonggarkan dan kemungkinan pelanggaranan terhadap kendala-kendala yang lain dikontrol melalui sebuah fungsi objektif.

Penyelesaian dari M1, jika ada, adalah suatu jadwal kuliah yang menyatakan pada blok waktu dan ruang yang mana setiap kegiatan harus dilaksanakan setiap minggu dan meminimumkan fungsi objektif. Untuk memperoleh jadwal yang diinginkan, kita tidak menyelesaikan secara langsung M1, melainkan dengan membagi masalah tersebut menjadi dua submasalah. Pertama, diselesaikan mengalokasian waktu yang sesuai untuk setiap kegiatan dengan meminimumkan tabrakan waktu. Yang kedua menentukan ruang tempat suatu kegiatan (yang sudah ditentukan waktunya) dilaksanakan sedemikian sehingga banyaknya mahasiswa yang tidak dapat memperoleh tempat duduk diminimumkan.

Untuk merumuskan submasalah pertama, misalkan $x_{ij}=1$ jika kuliah i dijadwalkan pada blok waktu j dan $x_{ij}=0$ untuk kasus lain. Dengan demikian submasalah ini dapat diturunkan dari M1 sebagai berikut.

$$f = \sum_{j=1}^{T} \sum_{\substack{p,q=1 \\ p,q \neq 1}}^{N} (\alpha . m(p,q) + \beta . D(p,q))\, x_{pj} . x_{qj} + \delta . RC \qquad (7)$$

dengan syarat:

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ij} = 1 \ (i = 1, \ldots, N), \qquad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ij} \leq Rj \ (j = 1, \ldots, T), \qquad (9)$$

$$l(i).\, x_{ijk} \leq d(j) \ (i = 1, \ldots, N;\ j = 1, \ldots, T), \qquad (10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \ (i = 1, \ldots, N;\ j = 1, \ldots, T), \qquad (11)$$

dengan RC menyatakan banyaknya kuliah yang melebihi kapasistas ruang. Di bagian belakang akan dijelaskan bagaimana menghitung tabrakan waktu untuk tempat duduk, sekalipun belum dilakukan alokasi ruang.

Oleh karena kita tidak menyelesaikan model-model matematika tersebut secara langsung, maka berikut akan dijelaskan metode heuristik yang diajukan. Perumusan di atas hanyalah untuk menyajikan hakekat dari permasalahan yang dihadapi. Pemakaian algortima heuristik, misalnya pencarian terlarang, dapat menyelesaikan masalah-masalah praktis beru-kuran besar dengan sangat cepat, dalam beberapa detik (Costa, 1994; Hertz, 1991; Hertz, 1992).

Penyelesaian yang Diajukan

Dalam mengembangkan metode yang diajukan, masalah penjadwalan dirumuskan sebagai masalah optimisasi kombinatorial. Pertama akan dibahas penyelesaian submasalah pertama, M2. Penyelesaian M2 dapat diinterpretasikan sebagai suatu partisi himpunan N kegiatan menjadi T subhimpunan yang saling lepas, masing-masing terdiri atas kegiatan yang dijadwalkan pada blok waktu

yang sama. Tanpa penentuan ruang, sebuah jadwal kuliah dapat dipandang sebagai suatu partisi $(S_1, S_2, \ldots, S_T)$ dari N tatap muka kuliah. Setiap subhimpunan S_t merupakan koleksi kuliah yang dijadwalkan pada blok waktu t dan setiap kegiatan hanya dimasukkan pada tepat satu subhimpunan S_t. Jelas suatu partisi demikian memenuhi syarat-syarat (8) dan (11).

Dalam hal ini suatu jadwal kuliah dikatakan fisibel jika jadwal tersebut adalah suatu partisi seperti di atas yang memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

(a) Untuk setiap blok waktu t dan kuliah x, jika $x \in S_t$, maka $l(x) \leq d(t)$; dan
(b) Untuk setiap blok waktu t, $|S_t| \leq R_t$

Dapat dilihat bahwa syarat (a) ekuivalen dengan kendala (10), dan dan syarat (b) ekuivalen dengan kendala (9).

Secara umum proses penyelesaaiannya terdiri atas empat langkah pokok:

(1) penyusunan daftar kegiatan kuliah yang didasarkan pada data mata kuliah dan data mahasiswa dan pembentukan matriks tabrakan waktu untuk mahasiswa dan dosen;
(2) penyusunan jadwal awal;
(3) perbaikan jadwal secara iteratif sampai banyaknya tabrakan waktu minimal atau mencapai suatu kriteria penghentian ditentukan; dan akhirnya
(4) pengalokasian ruang setiap kuliah (submasalah kedua).

Berikut diuraikan setiap langkah tersebut.

Penyusunan Daftar Kegiatan Kuliah

Daftar ini dapat disusun sebagai berikut. Mula-mula untuk setiap mata kuliah didaftar semua mahasiswa yang mengambilnya. Kedua, banyaknya tatap muka mingguan ditentukan berdasarkan nilai SKS masing-masing subjek. Misalnya, suatu mata kuliah 1 SKS terdiri atas satu tatap muka 50 menit, 2 SKS terdiri atas sekali tatap muka 100 menit, 3 SKS terdiri atas satu kali tatap muka 100 menit dan satu kali 50 menit, dst. Proses ini menghasilkan sebuah daftar semua tatap muka yang harus dijadwalkan pada blok-blok waktu dan ruang yang tersedia.

Untuk setiap kegiatan perlu ditentukan sebuah daftar kegiatan-kegiatan lain yang melibatkan dosen atau mahasiswa yang sama. Daftar ini memuat banyaknya mahasiswa dan dosen yang terlibat dalam kegiatan tersebut dan kegiatan-kegiatan lain yang tidak dapat dijadwalkan secara bersamaan. Daftar ini memudahkan untuk mengetahui pasangan-pasangan kegiatan mana yang melibatkan dosen atau mahasiswa yang sama, sehingga bermanfaat baik pada saat penyusunan jadwal awal maupun selama proses perbaikan, termasuk dalam perhitungan nilai fungsi objektif.

Penyusunan Jadwal Fisibel Awal

Sebuah jadwal fisibel awal disusun dengan mengalokasikan setiap kuliah pada suatu blok waktu dengan memperhatikan syarat-syarat (a) dan (b) di atas. Pemilihan waktu untuk setiap kuliah dilakukan secara acak. Meskipun demikian, beberapa heuristik diterapkan dalam proses ini. Untuk setiap kegiatan x, blok waktu terbaik t untuk menjadwalkan x secara acak. Dengan pemilihan secara acak ini, kita mungkin tidak perlu mengecek setiap blok waktu untuk mendapatkan blok waktu terbaik yang tidak memberikan suatu tabrakan waktu, sedemikian sehingga:

(1) Lama blok waktu t tidak lebih pendek daripada lama kegiatan x;
(2) Banyaknya kegiatan (selain x) yang telah dijadwalkan pada blok waktu t lebih kecil daripada banyaknya ruang yang tersedia, dan
(3) Apabila x dijadwalkan pada t, banyaknya tabrakan waktu minimal.

Sekalipun pemilihan waktu terbaik dilakukan secara acak, namun banyaknya iterasi dibatasi oleh banyaknya blok waktu. Blok waktu yang sudah terpilih pada suatu iterasi (sebelum waktu terbaik terpilih) berbeda dengan semua waktu yang terpilih sebelumnya. Pada iterasi pertama pemilihan dilakukan secara acak terhadap semua waktu yang ada. Jika hasilnya bukan waktu yang terbaik, maka waktu yang lain dipilih dari sisa waktu yang belum ada. Demikian seterusnya sampai waktu terbaik ditemukan. Jika semua waktu telah diselidiki maka waktu terbaik dapat ditentukan dan kegiatan tersebut dijadwalkan pada waktu tersebut. Proses tersebut diulangi untuk setiap kegiatan lain sampai semua kegiatan terjadwalkan.

Untuk perhitungan nilai fungsi objektif, didefinisikan tiga macam tabrakan waktu, yakni **tabrakan waktu mahasiswa**, **tabrakan waktu dosen**, dan **tabrakan waktu ruang**. Nilai dari fungsi objektif merupakan jumlah terboboti dari ketiga tabrakan waktu tersebut. Misalkan $s=(S_1, S_2, S_3, \dots, S_T)$ adalah jadwal fisibel terakhir. Untuk menghitung nilai tabrakan waktu mahasiswa dan

dosen, kita dapat mengecek setiap pasang kegiatan apakah salah satu kegiatan termasuk dalam daftar kegiatan lain yang terkait dengan kegiatan tersebut, sebagaimana dijelaskan di atas. Selanjutnya, untuk menghitung nilai tabrakan waktu ruang pada setiap blok waktu, daftar ruang yang tersedia dan daftar kegiatan (kelas) yang terjadwal pada waktu tersebut diurutkan berdasarkan kapasitas tempat duduk dan cacah mahasiswa, dari yang terbesar sampai yang terkecil. Setiap pasang ruang dan kelas dibandingkan. Apabila kapasitas ruang tidak lebih kecil daripada cacah mahasiswa, maka kegiatan yang bersangkutan dapat dijadwalkan pada ruang tersebut tanpa menimbulkan kekurangan tempat duduk. Sebaliknya, jika cacah mahasiswa melebihi kapasitas ruang, maka terjadi kekurangan tempat duduk (dihitung sebagai satu tabrakan waktu ruang). Total nilai tabrakan waktu pada blok waktu t diperoleh setelah semua kegiatan pada S_t dibandingkan dengan ruang-ruang yang bersesuaian. Akan digunakan lagi notasi yang digunakan sebelumnya, yakni $m(x,y)$ dan $D(x,y)$ yang berturut-turut menyatakan banyaknya mahasiswa dan dosen yang terlibat, dalam kegiatan x dan y dari S_t. Misalkan $r(t)$ menyatakan nilai tabrakan waktu ruang pada blok waktu t, maka total nilai tabrakan waktu mahasiswa, dosen, dan ruang pada jadwal s, berturut-turut, adalah

$$\sum_{t=1}^{T} \sum_{\substack{x \neq y \\ x,y \in S_t}} m(x,y), \quad \sum_{t=1}^{T} \sum_{\substack{x \neq y \\ x,y \in S_t}} D(x,y), \text{ dan } \sum_{t=1}^{T} r(t).$$

Nilai fungsi objektif sekarang dapat dihitung sebagai berikut:

$$f(s) = f((S_1, S_2, S_3, \dots, S_T))$$

$$= \sum_{t=1}^{T} (\alpha \sum_{\substack{x \neq y \\ x,y \in S_t}} m(x,y) + \beta_t \sum_{\substack{x \neq y \\ x,y \in S_t}} D(x,y), + \delta.r(t)) \qquad (12)$$

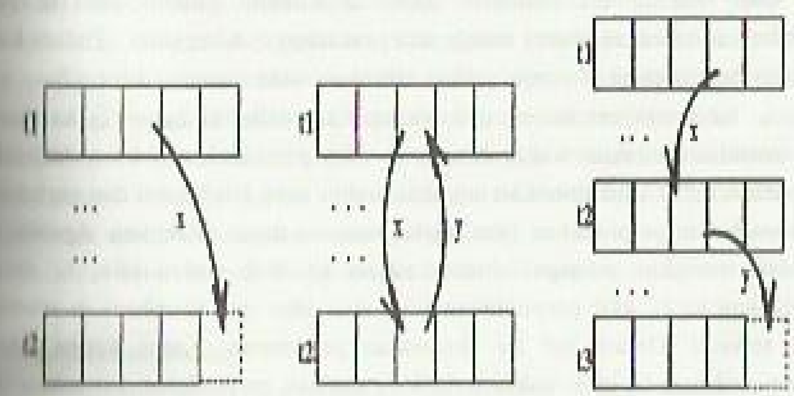
dengan parameter α, β, dan δ, berturut-turut, menyatakan bobot dari tabrakan waktu mahasiswa, dosen, dan ruang. Fungsi objektif (12) ekuivalen dengan (7), tetapi bentuknya berbeda.

Perbaikan Jadwal dengan Algoritma Pencarian Terlarang

Apabila jadwal awal yang tersusun masih memuat beberapa tabrakan waktu, maka perlu dilakukan perbaikan. Untuk meminimumkan tabrakan waktu ini digunakan suatu metode iteratif sederhana berdasarkan pada algoritma pencarian terlarang. Uraian tentang algoritma pencarian terlarang dan berbagai aplikasi serta implementasinya dapat ditemukan dalam berbagai artikel, misalnya dalam (Costa, 1994, Glover1989a, Glover1990, Hertz, 1991, Hertz1992, Hertz dan Werra 1987, Hertz dan Werra 1990, dan Schaerf, 1996). Berikut dijelaskan implementasi metode pencarian terlarang untuk masalah yang telah dirumuskan.

Komponen suatu metode pencarian terlarang terdiri atas: (1) sebuah *daftar tabu TB* yang memuat perpindahan-perpindahan yang telah dilakukan selama beberapa iterasi terakhir, (2) sebuah *fungsi aspirasi A* (yang terdefinisi untuk setiap nilai $f(s)$) untuk memungkinkan pembatalan status tabu suatu perpindahan, (3) *suatu persekitaran $N(s)$* dari jadwal fisibel s, dan (4) kriteria pemberhentian iterasi. Elemen-elemen dari daftar tabu TB terdiri atas pasangan-pasangan (x,t) dari kegiatan x dan blok waktu t yang menyatakan bahwa x telah dipindahkan dari blok waktu t ke blok waktu lain untuk memperoleh jadwal terbaik s^* di dalam $N(s)$. Suatu perpindahan $(s \to s')$ dikatakan tabu jika s' diperoleh dari s dengan melakukan realokasi x ke blok waktu t sedangkan $(x,t) \in TB$. Notasi $(s \to s') \in TB$ digunakan untuk menunjukkan suatu perpindahan tabu. Eksperimen telah dilakukan dengan berbagai ukuran TB untuk melihat efek ukuran daftar tabu terhadap penampilan algoritma pencarian terlarang. Seperti disarankan oleh Hertz, 1990, fungsi aspirasi A diberi nilai awal $A(f(x))=f(x)-1$. Untuk setiap jadwal s didefinisikan dua macam persekitaran $N(s)$. Persekitaran tipe pertama didefinisikan terdiri atas semua jadwal s' yang diperoleh dari s sedemikian

sehingga $(s \to s') \notin TB$ dan $f(s') < f(s)$. Persekitaran tipe kedua terdiri atas semua jadwal s' yang diperoleh dari s sedemikian sehingga $(s \to s') \notin TB$ atau $f(s') < A(f(s))$. Sekalipun dalam proses pembentukan persekitaran digunakan pemilihan acak, beberapa heuristik digunakan untuk mendapatkan jadwal "terbaik" (lihat uraian di bawah).



(a) Realokasi (b) Pertukaran (c) Pergeseran

Gambar 1.
Transsformasi Untuk Menghasilkan Jadwal Baru

Tiga macam transformasi digunakan untuk menghasilkan perse-kitaran dari suatu jadwal, yakni realokasi, pertukaran, dan pergeseran. Realokasi dilakukan dengan memindahkan kegiatan x dari blok waktu t_1 ke blok waktu lain t_2. Pertukaran dua kegiatan x (dari blok waktu t_1) dan y (dari blok waktu t_2) dilakukan dengan memindahkan x ke t_2 dan y ke t_1. Pergeseran adalah dua realokasi dari kegiatan x dari blok waktu t_1 ke blok waktu lain t_2 dan kegiatan y dari t_2 ke blok waktu baru t_3 selain t_1. Gambar 1 mengilustrasikan ketiga transformasi tersebut.

Dalam menghasilkan persekitaran tipe pertama, semua transformasi dapat digunakan untuk menghasilkan jadwal baru s' dari s yang memenuhi $(s$

$\to x') \notin TB$ dan $f(s') < f(s)$. Untuk melakukan perpindahan, mula-mula suatu blok waktu t_1 saat mana terjadi beberapa tabrakan waktu, dipilih secara acak dan sebuah kegiatan x yang menyebabkan tabrakan waktu dipilih. Selanjutnya, blok-blok waktu lain dicek satu persatu untuk menentukan waktu t_2 yang paling sesuai kemana, jika mungkin, x akan direalokasikan. Dalam hal ini terdapat empat kemungkinan. Kemungkinan pertama, tidak ada tabrakan waktu antara x dan semua kegiatan yang telah dijadwalkan pada t_2 dan memindahkan x ke t_2 bukan tabu. Oleh karena itu realokasi dapat dilakukan, asalkan hal ini tidak menimbulkan tabrakan waktu ruang, dan pemilihan t_2 dihentikan. (Dalam kasus ini, nilai fungsi objektif turun senilai tabrakan waktu karena keberadaan x di dalam S_{t1}. Kemungkinan kedua, terdapat tepat satu kelas di dalam S_{t2}, katakan y, yang memiliki tabrakan waktu dengan x. Jika pemindahan y ke t_1 (setelah x dikeluarkan dari t_1) memberikan tabrakan waktu yang lebih kecil dan pertukaran keduanya bukan perpindahan tabu, maka swaping dapat dilakukan. Apabila hal ini tidak mungkin, y dapat direalokasikan ke blok waktu lain, t_3, dan x dipindahkan ke t_2, asal perpindahan ini bukan tabu dan memberikan tabrakan waktu terkecil. Dalam hal ini digunakan pergeseran. Kasus ketiga adalah merealokasikan x ke blok waktu terbaik t_2, asalkan perpindahan ini bukan tabu dan memberikan tabrakan waktu terkecil. Kasus keempat terjadi jika tak satupun kemungkinan di atas terjadi. Sebagai alternatif dibentuk persekitaran tipe kedua.

Dalam menghasilkan persekitaran tipe kedua hanya digunakan realokasi dan pertukaran sedangkan pemilihan tidak didasarkan atas keberadaan suatu tabrakan waktu. Perpindahan didasarkan atas keberadaan suatu kelas pada setiap blok waktu. Mula-mula suatu blok waktu t_1 dengan $|S_{t1}| \geq 2$ dipilih secara acak. Selanjutnya, sebuah kelas x dipilih secara acak dari S_{t1}. Berikutnya, dipilih blok waktu lain, t_2, secara acak. Jika $|S_{t2}| < R_{t2}$ dan realokasi x ke t_2 bukan tabu atau menyebabkan nilai fungsi objektif lebih kecil daripada nilai fungsi aspirasi, maka x dipindahkan ke t_2. Jika tidak demikian, suatu kelas y dipilih secara acak dari S_{t2}. Jika pertukaran x dan y bukan tabu atau akan memberikan nilai fungsi objektif lebih kecil daripada nilai fungsi aspirasi, maka x dan y saling ditukar. Hal ini mungkin akan menghasilkan jadwal yang lebih jelek, namun akan meningkatkan kemungkinkan menghasilkan persekitaran jenis pertama.

Komponen penting lain dari pencarian terlarang sebagai suatu proses iteratif adalah kriteria penghentian. Hertz dan de Werra (1990) dan Hertz (1990,

1992) menggunakan dua kriteria untuk menghentikan roses iterasi, yakni dengan memberikan batas bawah terhadap nilai fungsi objektif dan membatasi banyaknya iterasi antara dua peningkatan terbaik. Apabila nilai fungsi objektif mencapai batas bawah tersebut yang diberikan (*LowBound*) atau maksimum banyaknya iterasi antara dua peningkatan terbaik dicapai (*MaxBest*), maka iterasi dihentikan. Akan tetapi, mungkin selama beberapa iterasi tidak terjadi peningkatan dari jadwal terakhir. (Jadwal terakhir mungkin berbeda dengan jadwal terbaik yang terakhir didapat). Penulis menambahkan satu kriteria penghentian dengan menggunakan banyaknya iterasi antara dua peningkatan (*tol*). Nilai ini disebut *toleransi*. Jika nilai toleransi tersebut mencapai nilai maksimum yang diberikan (*MaxTol*), iterasi dihentikan. Hal ini untuk menghindari iterasi selanjutnya yang mungkin tidak akan menghasilkan peningkatan terhadap jadwal terbaik yang terakhir didapat. Eksperimen telah dilakukan untuk menentukan nilai yang sesuai untuk batas atas toleransi dan maksimum iterasi antara dua peningkatan terbaik tersebut.

Pengalokasian Ruang

Jadwal akhir yang dihasilkan dari proses di atas adalah suatu partisi $(S_1, S_2, S_3, \ldots S_T)$ dari semua kegiatan kuliah. Partisi ini menentukan kegiatan-kegiatan mana saja yang dijadwalkan pada suatu blok waktu, namun belum menginformasikan di ruang mana setiap kuliah harus dilaksanakan. Pengalokasian ruang dijelaskan sebagai berikut.

Oleh karena banyaknya kelas pada setiap subhimpunan S_t tidak lebih besar daripada banyaknya ruang yang tersedia pada blok waktu t, maka kita dapat mengalokasikan sebuah ruang tepat pada satu kegiatan. Dengan kata lain, tidak akan terjadi dua kegiatan dijadwalkan pada ruang yang sama. Sebelum setiap kelas dialokasikan pada suatu ruang, kedua daftar ruang yang tersedia pada blok waktu t dan kegiatan yang terjadwal pada t diurutkan menurun masing-masing berdasarkan kapasitas tempat duduk dan cacah mahasiswa. Dua strategi pengalokasian digunakan. Jika tidak terjadi tabrakan waktu ruang dan $|S_t| < R_t$ maka setiap kelas (dari yang terkecil) dialokasikan ke sebuah ruang yang berlainan (dari ruang yang terkecil). Dengan cara ini kita berusaha meminimumkan banyaknya kursi kosong, sementara tidak ada kelas yang melebihi kapasitas ruangannya.Sebaliknya, jika terdapat tabrakan waktu ruang atau $S_k^j = R_i$, maka setiap kegiatan dialokasikan ke sebuah ruang, dari yang terbesar ke yang tekecil.

Dengan selesainya proses di atas, maka jadwal akhir dapat dinyatakan sebagai sebuah daftar tripel (t,r,s), dengan t, r, dan s berturut-turut adalah waktu, ruang, dan kegiatan kuliah. Daftar ini dapat disimpan dalam sebuah file. Beberapa informasi dapat dihasilkan dari data semula dan data olahan seperti: keseluruhan jadwal, daftar setiap kelas, dan jadwal setiap dosen atau mahasiswa.

Hasil-hasil Numerik

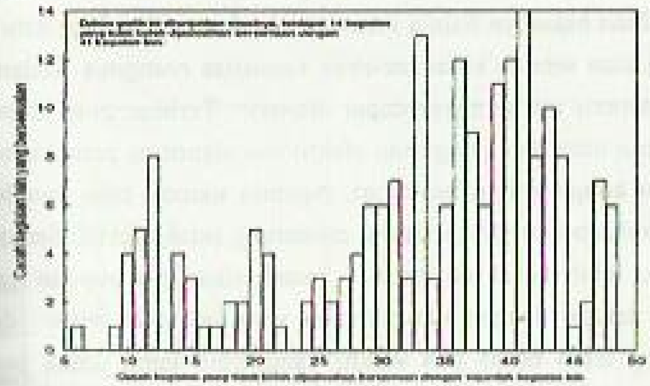
Untuk keperluan eksperimen, serangkaian data telah diambil dari FPMIPA IKIP YOGYAKARTA. Data tersebut mencakup 889 mahasiswa yang terdaftar pada semester kedua tahun akademik 1994/1995, terbagi dalam 149 kelas yang memiliki 207 tatap muka kuliah. Banyaknya mata kuliah yang diambil oleh setiap mahasiswa berkisar antara 1 dan 11. Kebanyakan mahasiswa mengambil antara 6 dan 9 mata kuliah, dengan rata-rata 6 mata kuliah per mahasiswa. Variasi mata kuliah yang diambil oleh mahasiswa menentukan tabrakan waktu antar kegiatan. Tabel 1 menunjukkan distribusi ukuran kelas dan gambar 2 menyajikan kendala untuk menghindari tabrakan waktu antar kegiatan kuliah. Setiap kegiatan mempunyai rata-rata 32 kegiatan lain yang tidak boleh dijawalkan secara bersamaan (baik karena adanya kesamaan dosen atau mahasiswa). Dalam eksperimen digunakan 14 ruang dengan kapasitas 40 kursi (3 ruang), 60 kursi (6 ruang), 80 kursi (4 ruang) dan 120 kursi (1 ruang). Waktu satu minggu (Senin s/d. Sabtu) terbagi atas 27 blok waktu.

Tabel 1. Distribusi Ukuran Kelas

Ukuran kelas (K)	Cacah kelas
1 ≤ K ≤ 40	64
40 < K ≤ 60	53
60 < K ≤80	27
80 < K ≤ 120	5
Total	149

Program ditulis dalam bahasa pemrograman C dan dijalankan pada sebuah komputer PC DX4-100 dengan sistem operasi *Linux*. Program tersebut

dapat menerima argumen untuk menyatakan ukuran tabu. Hasil-hasil eksperimen dengan berbagai ukuran tabu disajikan pada Tabel 2.



Gambar 2.
Kendala antarkegiatan kuliah

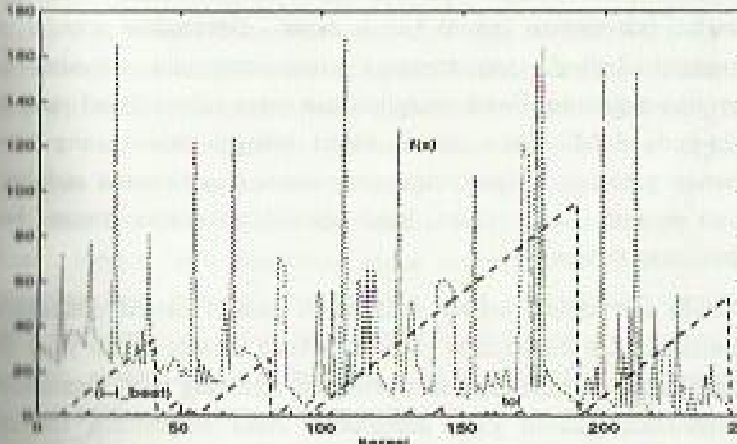
Kolom pertama adalah besarnya daftar tabu yang digunakan. Kolom kedua banyaknya ekesperimen yang dilakukan. Kolom ketiga adalah banyaknya ekseperimen yang memberikan nilai optimal terhadap fungsi objektif. Kolom keempat dan kelima berturut-turut adalah minimum dan maksimum banyaknya iterasi untuk menghasilkan jadwal optimal. Kedua kolom terakhir berturut-turut adalah maksimum banyaknya iterasi antara dua peningkatan dan dua peningkatan terbaik

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa program tersebut dapat menghasilkan jadwal yang optimal tanpa adanya tabrakan waktu bagi dosen, mahasiswa, maupun ruang. Dari Tabel 2 dapat diperhatikan hal-hal sebagai berikut. Untuk menghasilkan suatu jadwal optimal diperlukan paling sedikit 31 iterasi (dengan ukuran tabu 5) dan maksimum 7909 iterasi (dengan ukuran tabu 7). Rata-rata banyaknya iterasi untuk menghasilkan jadwal optimal adalah 377. Tergantung banyaknya iterasi yang diperlukan, program tersebut dapat menghasilkan jadwal fisibel dalam waktu yang sangat reliabel. Sebagai contoh, untuk melakukan 100 iterasi diperlukan sekitar 20 detik. Apabila program terhenti pada saat suboptimal, jadwal yang dihasilkan biasanya hanya memuat tabrakan waktu bagi satu atau dua mahasiswa, atau sebuah kelas melebihi kapasitas ruangnya. Dalam praktek kenyataan seperti ini mungkin dapat ditolerir. Terlihat pula pada tabel 2, bahwa ukuran tabu mempengaruhi efektivitas algoritma pencarian terlarang (bandingkan ketiga kolom pertama). Apabila ukuran tabu mendekati nol, maka algoritma pencarian terlarang cenderung tidak efektif. Secara umum, ukuran tabu lebih besar daripada 5 memberikan penampilan yang lebih baik. Akan tetapi, dengan ukuran tabu yang semakin besar diperlukan memori yang lebih besar dan waktu yang lebih lama untuk pengecekan daftar tabu pada setiap iterasi. Dengan memperhatikan dua kolom terakhir, tampaknya cukup sesuai untuk memilih banyaknya blok waktu (dalam hal ini 27) sebagai batas atas nilai toleransi (tol) dan nilai 10000 sebagai maksimum iterasi yang diperbolehkan antara dua peningkatan terbaik.

Tabel 2. Hasil-hasil eksperimen

Ukuran Tabu	Σ Eksperi-men	Optimal	Min Itex	Max Itex	Max Tol	Max Best
178	33	33	39	1964	10	1489
27	80	80	51	1424	11	1195
14	41	41	457	1500	11	1285
7	64	63	51	7909	12	7632
6	78	78	31	4305	10	4053
3	75	73	67	1249	11	2934
2	7	6	122	1314	10	801
1	22	20	137	739	15	465
0	21	13	67	1249	11	1548

Gambar 3 menunjukkan perilaku metode pencarian terlarang. Terlihat bahwa nilai fungsi objektif bersifat fluktualif selama proses iterasi, namun mencapai nilai nol pada akhir iterasi. Fluktuasi nilai fungsi objektif selama proses iterasi adalah akibat penggunaan persekitaran tipe kedua. Dalam gambar tersebut, i menyatakan iterasi dan i_{best} menyatakan iterasi pada saat diperoleh jadwal terbaik (nilai *f(s)* terendah).



Gambar 3.
Penampilan Algoritma Pencarian Terlarang

Untuk menguji kemampuan metode yang diajukan tersebut dalam menyelesaikan masalah-masalah yang memuat lebih banyak kendala antarkegiatan, suatu eskperimen telah dilakukan guna menambah beberapa kendala antarkegiatan (seolah-olah lebih banyak mahasiswa atau dosen yang sama yang terlibat dalam beberapa kegiatan). Penambahan tersebut meliputi 5 persen, 10 persen, sampai 30 persen lebih banyak kendalan antarkegiatan daripada data asli, dan didistribusikan secara acak ke kegiatan-kegiatan yang ada. Hasil yang diperoleh sejauh itu menunjukkan bahwa sampai penambahan 30 persen kendalan antarkegiatan, metode tersebut masih sanggup menghasilkan jadwal optimal. Akan tetapi, penambahan kendalan tersebut mengakibatkan lebih banyak iterasi diperlukan untuk mendapatkan jadwal yang optimal.

Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Dari uraian pada bagian-bagian sebelumnya dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

(1) Masalah penyusunan jadwal kuliah dapat dirumuskan sebagai masalah optimisasi. Jadwal yang tersusun harus memenuhi sejumlah kendala/persyaratan tertentu. Untuk menghasilkan suatu jadwal fisibel yang optimal, mula-mula didefinisikan jadwal fisibel sebagai jadwal yang memenuhi beberapa persyaratan. Persyaratan-persyaratan lain dikontrol melalui sebuah fungsi objektif. Dalam hal ini, fungsi objektif merupakan ukuran ''kualitas'' jadwal yang tersusun.

(2) Bermula dari sebuah jadwal awal, suatu peroses iteratif dilakukan untuk meminimumkan nilai fungsi objektif. Sebuah metode iterasi yang diajukan yang didasarkan pada algoritma pencarian terlarang telah digunakan untuk menghasilkan jadwal yang diinginkan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode tersebut dapat menghasilkan jadwal optimal dalam pengertian fungsi objektif yang telah didefinisikan. Dengan demikian, metode tersebut dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah penjadwalan kuliah di suatu perguruan tinggi.

Saran

Dari hasil penelitian ini dapat dilakukan kegiatan penelitian pengembangan sebagai berikut:

(1) Prototipe program yang disusun dapat dikembangkan menjadi sebuah sistem terpadu, seperti Sistem Pendukung Keputusan (*Decision Support System*). Sistem demikian dapat memberikan fasilitas untuk pemasukan data, penyusunan atau pembacaan suatu jadwal awal dan meningkatkan kualitas jadwal, serta database yang dapat memberikan informasi lengkap tentang jadwal kuliah secara keseluruhan atau jadwal untuk masing-masing dosen/mahasiswa. Informasi lain yang dapat dihasilkan dari jadwal tersebut adalah pemakain fasilitas seperti ruang dan alat-alat pengajaran seperti OHP, dll.

(2) Kendala-kendala yang diikutsertakan dalam masalah di atas sebenarnya merupakan persyaratan dasar untuk sebuah jadwal kuliah yang bebas tabrakan waktu yang melibatkan mahasiswa, dosen, maupun ruang atau tempat duduk. Beberapa persyaratan lain dapat ditambahkan sejauh data pendukungnya tersedia, misalnya faktor kesenangan waktu atau ruang bagi dosen, dll. Penambahan persyaratan lain dapat dimasukkan sebagai kondisi fisibilitas atau sebagai komponen baru pada fungsi objektif. Akan tetapi, oleh karena keterbatasan sumberdaya ruang dan waktu, suatu jadwal fisibel yang memenuhi semua persyaratan yang diberikan mungkin tidak ada. Dengan demikian perlu ditentukan persyaratan mana yang bersifat mutlak dan persyaratan mana yang bersifat tambahan. Dengan kata lain, persyaratan-persyaratan tersebut dapat diurutkan berdasarkan prioritas tertentu.

(3) Metode serupa dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah penjadwalan lain, misalnya penjadwalan ujian, penjadwalan pelajaran di sekolah. Hal terpenting dalam pemakaian metode pencarian terlarang adalah bagaimana suatu jadwal fisibel dan fungsi objektif didefinisikan serta bagaimana proses peningkatan dilakukan.

Daftar Pustaka

Aubin J. and J.A. Ferland (1989). A Large Scale Timetabling Problem.*Computers and Operations Research*, 16:67--77.

Cangalovic and Schreuder (1991) Exact Coloring Algorithm for Weighted Graph Applied to Timetabling Problems with Lectures of Different Length. *European Journal of Operational Research*, 51:248--258.

Carter, M.W. (1986). A Survey of Practical Applications of Examination Timetabling Algorithms. *Operations Research*, 34:193--202.

Costa, D. (1994). A Tabu Search Algorithm for Computing an Operational Timetable. *European Journal of Operational Research* 76 98--110.

de Werra, D. (1985). An Introduction to Timetabling. *European Journal of Operational Research*, 19:151--162.

Even, S., A.Itai, and A.Shamir (1976). On the Complexity of Timetable and Multicommodity Flow Problems. *SIAM Journal on Computing*, 5:691--703.

Glover, F. (1989a). "Tabu Search, Part I". *ORSA Journal on Computing*, 1:190--206.

Glover, F. (1989b) Tabu Search, Part II *ORSA Journal on Computing*, 2:4--32

Hertz, A. (1991). Tabu Search for Large Scale Timetabling Problems. *European Journal of Operational Research*. 54:39--47.

Hertz, A. (1992). Finding a Feasible Course Schedule using Tabu Search *Discrete Applied Mathematics*, 35:225--270.

Hertz and deWerra. (1987) Using Tabu Search Techniques for Graph Colouring. *Computing*, 39:345--351.

Hertz, A. and D.de Werra (1990). The Tabu Search Metaheuristic: How we use it. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 1:111--121.

Kiaer, L. and J. Yellen (1992). Weighted Graphs and University Course Timetabling. *Computers and Operations Research*, 19:59--67.

Mulvey, J.M. (1982). A Classroom/Time Assignment Model. *European Journal of Operational Research*, 9:64--70.

Schaerf, A. (1995). A Survey of Automated Timetabling. *Report CS-R95*, *Centrum voor Wiskunde en Informtica*.

Schaerf, A. (1996). Tabu search techniques for large high school timetabling. *Report CS-R9611*, *Centrum voor Wiskunde en Informtica*.

Tripathy, A. (1980). A Lagrangian Relaxation Approach to Course Timetabling. *Journal of the Operations Research Society*, 31:599--603.

Tripathy, A. (1992). Computerized Design Aid for Timetabling - A C Analysis. *Discrete Applied Mathematics*, 35:313--323.