MODEL OPTIMISASI ROBUST PADA MASALAH PENJADWALAN DI MASKAPAI PENERBANGAN

Jadwal penerbangan sering kali tidak dapat dioperasikan tepat waktu karena adanya gangguan-gangguan seperti cuaca buruk, kerusakan mesin pesawat, atau kepadatan bandara. Karena itu dan pesawat menjalankan serangkaian penerbangan setiap harinya, maka delay sebuah penerbangan dapat menyebabkan propagasi delay pada jadwal penerbangan lainnya. Oleh karena itu, penting bagi maskapai penerbangan merencanakan jadwal yang tidak sensitif terhadap gangguan.

Buku ini menyajikan hasil-hasil penelitian penulis tentang metode yang dapat digunakan untuk membangun robust airline schedule, yaitu penjadwalan yang disusun sedemikian sehingga dapat meminimalkan propagasi delay ketika dioperasikan, melalui pembangunan model optimisasi dari masalah penjadwalan di maskapai penerbangan. Model optimisasi yang disajikan dalam buku ini terdiri dari model optimisasi untuk melakukan pergeseran jam keberangkatan penerbangan, model optimisasi pengalokasian slack, dan formulasi robust counterpart dari model pergeseran jam keberangkatan penerbangan. Penulis juga menyajikan bagaimana membangun teknik penyelesaian model melalui pendekatan heuristik dan simulasi. Buku ini juga mengupas implementasi model-model optimisasi yang dibangun pada jadwal penerbangan suatu maskapai penerbangan di Indonesia.

Buku ini sangat cocok bagi pembaca yang tertarik untuk mempelajari riset operasi, khususnya model optimisasi masalah penjadwalan dan teknik penyelesaiannya.

MODEL OPTIMISASI ROBUST PADA MASALAH PENJADWALAN DI MASKAPAI PENERBANGAN

Dr. Khusnul Novianingsih

Dr. Khusnul Novianingsih

MODEL OPTIMISASI **ROBUST** PADA MASALAH PENJADWALAN DI MASKAPAI PENERBANGAN

MODEL OPTIMISASI ROBUST PADA MASALAH PENJADWALAN DI MASKAPAI PENERBANGAN

Dr. KHUSNUL NOVIANINGSIH

pena persada
CV. PENA PESRSADA

**MODEL OPTIMISASI ROBUST PADA MASALAH
PENJADWALAN DI MASKAPAI PENERBANGAN**

Penulis :

Dr. Khusnul Novianingsih

ISBN : 978-623-6837-28-3

Design Cover :

Retnani Nur Briliant

Layout :

Hasnah Aulia

Penerbit CV. Pena Persada

Redaksi :

Jl. Gerilya No. 292 Purwokerto Selatan, Kab. Banyumas Jawa
Tengah

Email : penerbit.penapersada@gmail.com

Website : penapersada.com

Phone : (0281) 7771388

Anggota IKAPI

All right reserved

Cetakan pertama : 2020

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang.

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan cara
apapun tanpa ijin penerbit

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahahirabbil'aalamien, puji dan syukur penulis limpahkan kepada Allah SWT yang telah memberikan waktu dan petunjuk kepada kami, sehingga kami dapat menyelesaikan buku dengan judul “Model Optimisasi *Robust* pada Masalah Penjadwalan di Maskapai Penerbangan”.

Buku ini berisikan hasil-hasil penelitian penulis tentang metode yang dapat digunakan untuk membangun *robust airline schedule*, yaitu penjadwalan yang disusun sedemikian sehingga dapat meminimumkan propagasi *delay* ketika dioperasikan. Model-model optimisasi yang telah dihasilkan terdiri dari model optimisasi untuk melakukan pergeseran jam keberangkatan penerbangan, model optimisasi pengalokasian *slack*, dan formulasi *robust counterpart* dari model pergeseran jam keberangkatan penerbangan.

Selama menyelesaikan buku ini, penulis telah banyak mendapat bantuan, arahan dan dukungan dari beberapa pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi yang telah memberikan dana penelitian melalui Hibah Produk Terapan tahun 2016-2017, dan Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) tahun 2018-2020.
2. Segenap pimpinan dan rekan-rekan dosen di Departemen Pendidikan Matematika Universitas Pendidikan Indonesia atas dukungan dan fasilitas-fasilitas yang disediakan untuk mendukung terlaksanannya penelitian.
3. Seluruh staf LPPM Universitas Pendidikan Indonesia yang telah banyak membantu kelancaran proses penelitian penulis.
4. Dr. Rieke Hadiani atas segala arahan, bimbingan, dan masukan-masukan selama melakukan penelitian.
5. Tim peneliti penulis yang telah banyak membantu dan meluangkan waktu demi kelancaran penelitian.
6. Pihak-pihak lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu-satu.

Penulis menyadari bahwa isi buku ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran pembaca untuk penyempurnaan buku. Akhirnya, penulis berharap semoga buku ini dapat bermanfaat bagi semua pihak, khususnya pembaca yang tertarik untuk mempelajari masalah optimisasi penjadwalan di maskapai penerbangan.

Bandung, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	vii
BAB 1 MASALAH PENJADWALAN PADA MASKAPAI PENERBANGAN	
A. Tahapan Penjadwalan di Maskapai Penerbangan	1
B. Gangguan Pengoperasian Jadwal di Maskapai Penerbangan	4
C. Masalah Delay Penerbangan di Indonesia dan Penanggulangannya	6
BAB 2 MODEL OPTIMISASI PERGESERAN JAM KEBERANGKATAN PENERBANGAN	
A. Model Delay Keberangkatan.....	9
B. Model Pergeseran	11
C. Model Pergeseran dengan Kombinasi Propagasi Delay .	14
D. Perhitungan Slack Optimal	16
E. Sifat-Sifat Model Pergeseran	19
F. Teknik Penyelesaian	20
G. Simulasi untuk Mengukur Kerobustan Jadwal	21
H. Hasil Implementasi.....	22
BAB 3 MODEL OPTIMISASI ROBUST PADA MASALAH PERGESERAN JAM KEBERANGKATAN PENERBANGAN	
A. Masalah Rotasi Pesawat.....	26
B. Delay Penerbangan dalam Push-Back Recovery	27
C. Delay Penerbangan pada Perturbed Routing	30
D. Model Optimisasi Robust pada Masalah Pergeseran Jam Keberangkatan Penerbangan	37
E. Hasil Implementasi.....	41
BAB 4 PENUTUP	44
REFERENSI.....	46
TENTANG PENULIS	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	:	Proses perencanaan penjadwalan pada maskapai penerbangan	2
Gambar 2	:	Contoh pergeseran jam keberangkatan penerbangan	12

DAFTAR TABEL

Tabel 1	:	Karakteristik jadwal asli.	23
Tabel 2	:	Hasil-hasil model OPT 1 dan OPT 2	23
Tabel 3	:	Ukuran-ukuran ke-robust-an jadwal	24
Tabel 4	:	Distribusi dari total delay keberangkatan dari jadwal asli dan jadwal baru	24
Tabel 5	:	Hasil-hasil pergeseran jam keberangkatan penerbangan	42
Tabel 6	:	Perbandingan ke-robust-an jadwal awal dan jadwal hasil perturbasi	43

**MODEL OPTIMISASI ROBUST
PADA MASALAH PENJADWALAN DI
MASKAPAI PENERBANGAN**

BAB 1

MASALAH PENJADWALAN PADA MASKAPAI PENERBANGAN

Perencanaan penjadwalan pada maskapai penerbangan adalah suatu proses untuk menyusun jadwal-jadwal yang berkaitan dengan penerbangan, pesawat, dan kru yang dimiliki oleh maskapai penerbangan. Karena melibatkan banyak sumber daya maskapai penerbangan, maka proses penyusunan jadwal merupakan masalah penjadwalan yang kompleks dan berukuran besar (*large scale problem*).

A. Tahapan Penjadwalan di Maskapai Penerbangan

Untuk mengurangi kompleksitas dari masalah, pada prakteknya proses perencanaan penjadwalan tersebut dibagi empat tahap, yaitu: penyusunan jadwal penerbangan (*flight schedule generation*), penugasan tipe pesawat (*fleet assignment*), penyusunan rotasi pesawat (*aircraft routing*), dan penyusunan jadwal kru (*crew scheduling*). Tahap-tahap tersebut diilustrasikan pada Gambar 1.

Tahap penyusunan jadwal penerbangan adalah suatu tahap yang sangat penting bagi maskapai penerbangan, karena hasil-hasil dari tahap ini akan mempengaruhi setiap pengambilan keputusan pada saat pengoperasian jadwal dan berhubungan langsung dengan keuntungan yang akan diperoleh maskapai jika jadwal penerbangan tersebut dioperasikan. Keluaran dari tahap ini, yaitu jadwal penerbangan, akan digunakan sebagai masukan bagi tahap-tahap selanjutnya. Biasanya perencanaan jadwal penerbangan disusun 12 bulan sebelum jadwal dioperasikan atau sekurang-kurangnya sembilan bulan sebelumnya (Lohatepanont, 2001). Proses penyusunan jadwal dimulai dengan pembangunan rute-rute penerbangan dan frekuensi setiap harinya berdasarkan perkiraan jumlah penumpang, jumlah pesawat yang dimiliki,

regulasi penerbangan yang ada, ketersediaan sumber daya manusia dalam maskapai, dan perkiraan strategi pasar dari maskapai-maskapai penerbangan lain. Rencana maskapai untuk memperluas ekspansinya juga menjadi pertimbangan penting untuk memutuskan rute-rute penerbangan baru yang akan ditawarkan.

Gambar 1 . Proses perencanaan penjadwalan pada maskapai penerbangan.

Setelah jadwal penerbangan selesai disusun, maskapai penerbangan akan menyelesaikan masalah penugasan tipe pesawat. Masalah penugasan tipe pesawat adalah masalah memasangkan setiap tipe pesawat yang dimiliki maskapai penerbangan ke sejumlah penerbangan sehingga kapasitas tempat duduk yang tersedia di pesawat sesuai dengan perkiraan jumlah penumpang (Lan, 2003). Tujuan dari penyelesaian masalah ini adalah untuk meminimumkan biaya operasional dan kehilangan pendapatan yang diakibatkan tempat duduk pesawat yang tidak selalu laku terjual. Sejumlah kendala yang berkaitan dengan *aircraft balance* pada jaringan dan banyaknya jumlah pesawat yang dimiliki maskapai penerbangan untuk setiap tipe harus dipenuhi. Kendala *aircraft balance* menjamin bahwa banyaknya penerbangan yang tiba ke suatu bandara yang dijalankan setiap pesawat pada setiap tipenya sama dengan banyaknya penerbangan yang berangkat dari bandara tersebut.

Jadwal penerbangan dan jadwal penugasan tipe pesawat akan digunakan maskapai penerbangan untuk membuat jadwal rotasi pesawat, yaitu barisan penerbangan yang akan dijalankan

oleh setiap pesawat. Setiap rotasi pesawat yang dibentuk harus memenuhi aturan tempat parkir pesawat dan pemeliharaan pesawat. Aturan-aturan tersebut memuat aturan tentang pemeliharaan pesawat secara berkala setelah pesawat melakukan sejumlah jam terbang (*flight time/FT*). Pesawat juga harus melakukan *grounded* setelah melewati batas FT yang diperbolehkan.

Tahap terakhir dari perencanaan penjadwalan pada maskapai penerbangan adalah penyusunan jadwal penugasan kru pesawat. Setiap kru pesawat akan dipasangkan pada sejumlah penerbangan sehingga diperoleh total biaya kru yang minimum. Karena kompleksitas masalah yang besar, biasanya penyusunan jadwal penugasan kru pesawat diselesaikan dalam dua fase. Fase pertama dalam proses penjadwalan kru adalah membangkitkan pairing kru. adalah barisan penerbangan yang dijalankan oleh satu kelompok kru atau lebih, dimulai sejak keberangkatan dari bandara tertentu yang disebut *crew base* pada penerbangan pertama hingga kembali pada *crew base* pada penerbangan terakhir. Sejumlah regulasi yang berkaitan dengan jam kerja kru harus dipertimbangkan dalam pembentukan pairing. Regulasi tersebut di antaranya mengatur batasan jam terbang kru, periode istirahat kru, dan jeda waktu antar dua penerbangan. Selanjutnya, himpunan pairing terkecil akan dipilih. Himpunan pairing terkecil memuat semua penerbangan dan pairing-pairing dalam himpunan tersebut akan membutuhkan biaya operasional yang minimum.

Setelah himpunan pairing terkecil terpilih, fase selanjutnya adalah memasang himpunan pairing terpilih ke kru-kru yang ada sedemikian sehingga total biaya penugasan kru yang dibutuhkan minimum. Keluaran dari tahap ini adalah jadwal kerja kru selama periode waktu tertentu. Pemasangan pairing-pairing pada kru harus memperhatikan sejumlah kendala yang berkaitan dengan FT, jam istirahat, cuti, tes kesehatan, dan kendala-kendala lain yang berkaitan dengan regulasi internasional, regulasi nasional, dan peraturan-peraturan kerja yang berlaku pada maskapai. Karena setiap

maskapai penerbangan mempunyai peraturan kerja yang berbeda-beda, maka model-model penugasan kru setiap maskapai penerbangan mempunyai kekhasan sendiri. Akibatnya, model penugasan kru dari suatu maskapai penerbangan belum tentu dapat diaplikasikan langsung untuk menyelesaikan masalah penugasan kru pada maskapai yang lainnya, tetapi memerlukan penyesuaian terlebih dahulu sebelum pengaplikasiannya.

B. Gangguan Pengoperasian Jadwal di Maskapai Penerbangan

Bagi sebagian besar maskapai penerbangan di dunia, biaya kru adalah biaya kedua terbesar yang dikeluarkan maskapai penerbangan setelah biaya bahan bakar (Schaefer dkk., 2005; Yen dan Birge, 2006). International Air Transport Association (IATA) dalam laporan akhir tahun 2014 mencatat bahwa total biaya pengeluaran maskapai-maskapai penerbangan untuk bahan bakar sebesar \$208 milyar pada tahun 2013 dan \$204 milyar pada tahun 2014 (IATA, 2014). Sedangkan untuk biaya kru, maskapai-maskapai penerbangan harus mengeluarkan biaya sebesar \$142 milyar pada tahun 2014, naik jumlahnya dari \$135 milyar pada tahun sebelumnya. Biaya bahan bakar sulit untuk dikendalikan oleh maskapai penerbangan karena biaya bahan bakar sangat bergantung dari harga minyak dunia. Oleh karena itu, salah satu cara yang dapat dilakukan maskapai penerbangan untuk meminimumkan biaya operasional maskapai adalah dengan mengoptimalkan jadwal penugasan kru.

Selain biaya bahan bakar dan biaya kru, biaya terbesar yang dikeluarkan oleh maskapai penerbangan adalah biaya delay penerbangan (Schaefer dkk. (2005), Yen dan Birge, 2006, Lan, 2003). Besarnya biaya delay penerbangan disebabkan karena luasnya dampak negatif dari delay. Karena setiap pesawat atau kru menjalankan barisan penerbangan setiap harinya, maka delay sebuah penerbangan dapat mengakibatkan propagasi delay pada penerbangan-penerbangan lain. Jika delay penerbangan berlangsung terlalu lama, maka penerbangan

dapat dibatalkan. Sejumlah kompensasi karena delay yang lama atau pembatalan penerbangan harus dibayar oleh maskapai kepada para penumpang. Penggunaan kru cadangan juga sering diputuskan maskapai penerbangan untuk meminimumkan propagasi delay meskipun biaya kru cadangan cukup mahal.

Selain menaikkan biaya operasional maskapai penerbangan, delay penerbangan juga banyak merugikan penumpang. Adanya delay penerbangan akan menimbulkan kerugian waktu bagi penumpang dan ketidakpuasan penumpang atas pelayanan maskapai penerbangan. Kepuasan penumpang akan pelayanan jasa suatu maskapai penerbangan sangat mempengaruhi keberlanjutan penumpang untuk menggunakan penerbangan-penerbangan pada maskapai penerbangan tersebut di masa depan dan membentuk citra maskapai penerbangan bagi masyarakat luas. Karena pendapatan maskapai penerbangan sangat dipengaruhi oleh banyaknya penumpang pesawat, maka maskapai penerbangan harus memberikan pelayanan terbaik bagi para penumpangnya. Salah satu caranya adalah dengan meminimumkan dampak delay penerbangan.

Pada tahun 2010, Federal Aviation Administration (FAA) mempublikasikan hasil penelitian tentang kerugian finansial yang disebabkan delay penerbangan sepanjang tahun 2007 di Amerika Serikat, yaitu sebesar \$31.2 triyun (Ball dkk., 2007). Besarnya biaya yang disebabkan delay meningkat pada tahun 2010 menjadi \$32.9 triyun. Laporan Akhir IATA tahun 2014 mencatat bahwa maskapai-maskapai penerbangan wilayah Eropa pada tahun 2014 mengeluarkan biaya delay sebesar \$3.8 triyun, dan kerugian penumpang akibat delay diperkirakan sebesar \$7.7 triyun (IATA, 2014).

Sebagian besar penelitian-penelitian tentang masalah-masalah penjadwalan pada maskapai penerbangan membangun model-model optimisasi dari masalah-masalah penjadwalan dengan berasumsi bahwa jadwal-jadwal yang telah disusun dapat dioperasikan sesuai dengan rencana. Pada prakteknya, setiap hari maskapai penerbangan berhadapan dengan kondisi-

kondisi yang mengganggu pelaksanaan jadwal seperti cuaca buruk, kepadatan bandara, lalu lintas penerbangan yang sibuk, dan kerusakan pesawat. Gangguan-gangguan ini dapat menyebabkan delay atau pembatalan penerbangan. Adanya asumsi bahwa jadwal penerbangan akan dapat dioperasikan sesuai rencana mengakibatkan maskapai penerbangan harus mengeluarkan biaya operasional tambahan karena adanya delay atau pembatalan penerbangan. Jumlah biaya tambahan tersebut sering kali jauh lebih besar dari biaya operasional yang direncanakan (AhmadBeygi dkk, 2010). Fakta ini menunjukkan bahwa jadwal yang optimal pada tahap perencanaan belum tentu merupakan jadwal yang optimal ketika dioperasikan.

C. Masalah Delay Penerbangan di Indonesia dan Penanggulangannya

Di dalam negeri sendiri, sejak tahun 2011 Kementerian Perhubungan Republik Indonesia mengeluarkan daftar persentase ketepatan waktu penerbangan-penerbangan (*on-time performance*) pada maskapai-maskapai penerbangan di Indonesia. *On-time performance* (OTP) adalah ukuran yang menyatakan persentase penerbangan yang datang menuju *gate* tidak lebih dari 15 menit dari jadwal kedatangan yang direncanakan. Rata-rata OTP maskapai-maskapai penerbangan pada tahun 2011 adalah 66.7. Rata-rata OTP meningkat menjadi 69.7 pada tahun 2012 dan 77.8 pada tahun 2013. Sepanjang tahun 2014 tercatat rata-rata OTP sebesar 79.2. Meskipun setiap tahunnya terjadi peningkatan OTP, tetapi di tahun 2018 masih terdapat lebih dari 20% penerbangan-penerbangan yang mengalami delay. Data ini menunjukkan bahwa delay penerbangan di Indonesia masih cukup tinggi.

Di lain pihak, jumlah pengguna jasa penerbangan di Indonesia mengalami peningkatan setiap tahunnya. Sepanjang tahun 2011 dan 2012 tercatat jumlah penumpang pesawat dari bandara-bandara Indonesia ataupun menuju Indonesia masing-masing sebesar 66.7 juta dan 69.7 juta. Jumlah penumpang pesawat mengalami kenaikan yang signifikan pada tahun 2013 menjadi 81.5 juta orang. Hingga akhir tahun 2014 terdapat 86.3

juta orang telah menggunakan jasa penerbangan di Indonesia, dan diperkirakan jumlah penumpang akan meningkat sebesar lebih dari 5% per tahun. Padahal, salah satu faktor penyebab delay penerbangan adalah tingginya jumlah penumpang pesawat. Semakin banyak penumpang pesawat, maka semakin padat aktifitas di bandara-bandara di Indonesia. Jika maskapai penerbangan di Indonesia tidak mempunyai sistem penjadwalan yang baik, maka dapat dipastikan banyaknya delay penerbangan akan semakin meningkat dan maskapai penerbangan akan banyak mengalami kehilangan pendapatan. Jika kondisi ini terus terjadi, maka peningkatan OTP mungkin tidak akan selamanya terjadi. Oleh karena itu, maskapai-maskapai penerbangan perlu untuk meningkatkan kualitas penjadwalan baik di tahap perencanaan jadwal maupun pada tahap pengoperasian jadwal.

Menurut Pasal 146 Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan, terdapat tiga faktor yang menyebabkan delay penerbangan, yaitu: faktor teknis operasional, faktor non teknis operasional, dan faktor cuaca. Faktor teknik operasional biasanya disebabkan adanya antrian pesawat yang akan lepas landas atau mendarat, gangguan landasan bandara, atau adanya masalah pengisian bahan bakar. Faktor-faktor non teknis operasional disebabkan oleh keterlambatan pilot atau katering, dan menunggu penumpang. Sedangkan faktor cuaca meliputi hujan lebat, kecepatan angin yang tinggi, dan kabut asap.

Ditinjau dari penyebabnya, delay penerbangan adalah kejadian yang tidak mungkin untuk dihindari terutama delay yang disebabkan faktor cuaca. Oleh karena itu, tindakan yang dapat maskapai penerbangan lakukan untuk menangani masalah delay penerbangan adalah meminimumkan dampak delay agar tidak mengakibatkan propagasi delay yang besar pada penerbangan-penerbangan lain.

Delay penerbangan terjadi akibat adanya gangguan-gangguan yang menyebabkan jadwal penerbangan tidak dapat dioperasikan sesuai dengan jadwal yang direncanakan. Bagi maskapai penerbangan, terdapat dua strategi untuk menangani

masalah gangguan-gangguan pada pengoperasian jadwal. Strategi pertama adalah dengan melakukan optimisasi ulang pada jadwal setelah gangguan terjadi. Proses ini terkenal dengan sebutan *recovery* jadwal. Ketika sebuah penerbangan mengalami gangguan, untuk meminimumkan dampak gangguan pada penerbangan-penerbangan lain maskapai penerbangan harus secepatnya melakukan *recovery* jadwal-jadwal yang akan dioperasikan. Prosedur *recovery* dijalankan untuk menentukan penerbangan-penerbangan mana saja yang harus di delay atau dibatalkan, membuat rute baru bagi perjalanan pesawat (*aircraft recovery*), penugasan baru bagi kru (*crew recovery*), maupun membuat rute baru bagi penumpang (*passenger recovery*). Masalah *recovery* adalah masalah yang berukuran besar karena melibatkan banyak variabel. Masalah tersebut juga merupakan masalah yang kompleks dan sulit untuk diselesaikan (*NP-hard problem*) karena melibatkan banyak kendala. Sebagian besar maskapai penerbangan di dunia menyelesaikan masalah *recovery* secara manual, hanya berdasar intuisi dari pengambil keputusan (Abdelghany dkk., 2004).

Strategi yang ke dua untuk mengatasi masalah gangguan pada penjadwalan adalah dengan merencanakan *robust schedule*. *Robust schedule* dirancang untuk mengurangi dampak dari gangguan penjadwalan pada saat pengoperasian jadwal. Dengan demikian, biaya pengoperasian *robust schedule* diharapkan lebih kecil dibandingkan dengan biaya pengoperasian jadwal yang dibangun dengan metode tradisional.