

## Perhitungan Berat dan Keseimbangan Pesawat Udara Dengan Pemodelan Matematika Menggunakan Microsoft Excel

Aji Jatmika Atmawijaya\*

\*Akademi Teknologi Aeronautika Siliwangi, Jl. Pajajaran 120 Bandung

[aji.jatmika@gmail.com](mailto:aji.jatmika@gmail.com)

### Abstrak

Terdapat banyak faktor yang bisa mempengaruhi operasi pesawat udara untuk menjadi efisien dan selamat, di antaranya adalah menjaga berat dan keseimbangan dengan baik. Perhitungan berat dan keseimbangan yang akurat merupakan hal yang penting terutama karena letak pusat gravitasi mempengaruhi kinerja pesawat udara. Sekalipun terdapat buku panduan dari pabrikan pesawat udara dan bahkan perangkat lunak atau sistem informasi berbayar tertentu untuk menentukan letak pusat gravitasi, kadang-kadang diperlukan upaya menggunakan sumber daya yang mudah didapat berupa aplikasi komputer yang umum dengan terlebih dahulu mengekstrak informasi dari buku panduan dan membuat pemodelan matematika dari informasi tersebut kemudian diterapkan pada aplikasi komputer tersebut. Dalam makalah ini dikemukakan suatu upaya sederhana penentuan pusat gravitasi pesawat udara dengan pemodelan matematika menggunakan Microsoft Excel. Model matematika yang dikembangkan dapat digunakan untuk bahan belajar perhitungan berat dan keseimbangan pesawat udara dan membangun perangkat lunak atau sistem informasi yang dapat diterapkan untuk maskapai penerbangan.

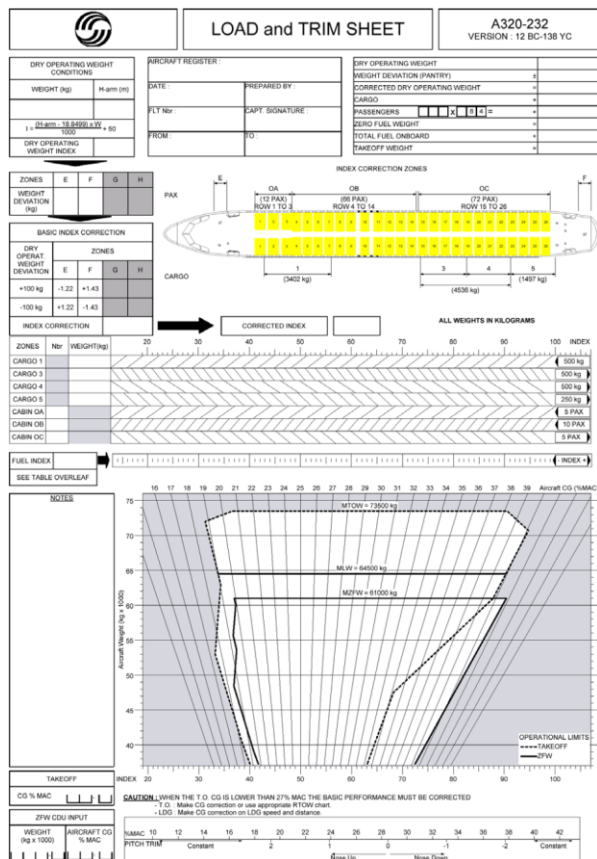
**Kata kunci :** berat dan keseimbangan, pusat gravitasi, model matematika, aplikasi komputer

### Pendahuluan

Penelitian ini dilakukan oleh penulis pada saat masih aktif sebagai *Aircraft Performance Engineer* di sebuah perusahaan swasta bernama *Flight Focus (FF) Pte Ltd* (selanjutnya disebut perusahaan) sekira tahun 2012. Penelitian ini dilatarbelakangi keinginan perusahaan untuk menawarkan solusi yang lebih mudah dan murah bagi para calon pelanggan yaitu maskapai penerbangan dalam melakukan perhitungan berat dan keseimbangan (*Weight and Balance*, disingkat WB, selanjutnya disebut WB) dari pesawat udara yang dimilikinya sebelum terbang.

Perhitungan WB sangat diperlukan karena merupakan salah satu faktor vital yang menentukan operasi pesawat udara yang efisien dan selamat<sup>[1]</sup>, salah satunya berdasarkan karakteristik pesawat udara itu sendiri sebagaimana yang didefinisikan dalam dokumen *Weight and Balance Manual (WBM)*<sup>[2]</sup>.

Pada awalnya, perhitungan WB dilakukan secara manual oleh seorang *Load Master* menggunakan lembar khusus yang disebut *Load and Trim Sheet* (disingkat LTS, selanjutnya disebut LTS), sebagaimana ditunjukkan Gambar 1 dari pesawat udara Airbus A320-232 berikut:



Gambar 1. Load and Trim Sheet<sup>[2]</sup>

Perhitungan WB oleh *Load Master* dilakukan pada lembar tersebut dan angka-angka hasil perhitungan pun ditampilkan pada lembar tersebut.

Namun dengan berkembangnya sistem komputer dan informasi, pelaku perhitungan WB cenderung berubah dari manusia ke sistem komputer yang canggih. Sistemnya dapat berupa modul aplikasi yang terpasang di kokpit bagi pilot<sup>[3]</sup>, sampai sistem lebih besar dan rumit, misalnya karena sistem ini bisa saja dipadukan dengan sistem pemesanan tiket.

Dengan sistem komputer ini, penggunaan LTS sudah tidak diperlukan lagi karena sistem tersebut dapat langsung menampilkan atau mencetak angka-angka hasil perhitungan WB.

Pada dasarnya sistem ini sangat mendukung operasi penerbangan. Namun karena besar dan rumitnya sistem, biaya pengembangan, operasional, dan perawatannya cukup mahal. Belum lagi jika

penggunaannya berbayar untuk jangka waktu tertentu. Tentunya ini memberatkan maskapai penerbangan yang hanya mempunyai kemampuan keuangan yang terbatas. Bahkan maskapai penerbangan yang mempunyai kemampuan keuangan yang memadai belum tentu juga akan menggunakan sistem ini jika ada pilihan lain yang lebih mudah dan murah.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk dapat menjadi dasar pengembangan sistem komputer WB yang canggih tetapi dengan perhitungan yang cukup sederhana sehingga lebih mudah dan murah. Dengan demikian sistem yang dikembangkan ini diharapkan dapat menjadi pilihan yang kompetitif di pasaran bagi banyak maskapai penerbangan.

## Metodologi

Penelitian ini didahului dengan pelatihan bagi penulis oleh praktisi WB yaitu *Load Master* dari maskapai penerbangan AirAsia Malaysia yang juga merupakan calon pelanggan. Tema pelatihan ini terutama berkaitan dengan penggunaan LTS, termasuk perhitungan WB menggunakan lembar tersebut supaya penulis mempunyai gambaran dan pengalaman bagaimana melakukan perhitungan WB secara manual.

Tugas penulis dalam penelitian ini sesuai dengan posisi sebagai *Aircraft Performance Engineer* adalah mengekstrak informasi dari literatur berupa WBM yang dipergunakan maskapai penerbangan baik untuk training atau operasi penerbangan kemudian menilai apakah informasi dari dokumen tersebut dapat diterapkan menjadi aplikasi komputer untuk perhitungan WB.

Penulis dalam prakteknya langsung menggunakan informasi dari dokumen dengan menerapkannya menjadi model matematika menggunakan aplikasi *Microsoft Excel* (disingkat MS Excel, selanjutnya disebut Excel) 2007.

Pembuatan model matematika dirasa penulis sesuai dengan kebutuhan karena berangkat dari masalah nyata yang dapat

dinyatakan dengan model matematika. Dengan model matematika, dapat diperoleh solusi matematika. Dengan adanya solusi matematika ini, dapat diperoleh interpretasi atau dilakukan prediksi yang bermanfaat bagi penyelesaian atau perbaikan masalah nyata tersebut<sup>[4][5][6]</sup>.

Penggunaan Excel dilakukan karena dianggap penulis merupakan aplikasi komputer yang fiturnya cukup sederhana dan penggunaannya juga cukup mudah, di samping Excel merupakan aplikasi yang sudah terpasang pada komputer yang disediakan perusahaan. Namun di dunia ini ternyata Excel cukup memadai untuk pemodelan matematika untuk banyak keperluan para profesional<sup>[7][8]</sup>.

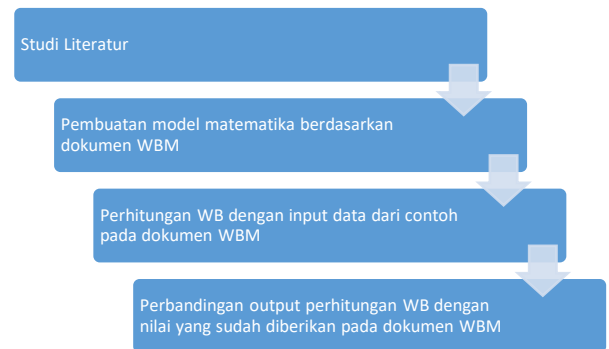
Penulis melakukan penelitian dengan studi kasus keluarga pesawat udara Airbus A320 karena calon pelanggan awal mempunyai armada pesawat udara dengan jenis tersebut. Namun karena ada kesamaan kelas dengan B737, pada perkembangan selanjutnya penelitian juga dilakukan terhadap jenis pesawat udara lain, yaitu B737-400 dengan dasar dokumen WBM dari jenis pesawat udara ini<sup>[9]</sup>.

Penelitian yang dilakukan juga mempunyai tujuan lanjutan untuk membuat model matematika yang dapat diserahkan kepada *Software Developer* untuk ditulis dengan kode pemrograman guna mengembangkan sistem perhitungan WB pesawat udara yang canggih.

Model matematika yang dibangun sendiri menggunakan fungsi-fungsi dalam bagian formula Excel yang umum, misalnya:

- Penjumlahan angka atau sel dengan +
- Pengurangan angka atau sel dengan -
- Perkalian angka atau sel dengan \*
- Pembagian angka atau sel dengan /
- Penjumlahan sederet sel dengan SUM
- Fungsi IF
- Fungsi MAX
- Fungsi LOOKUP

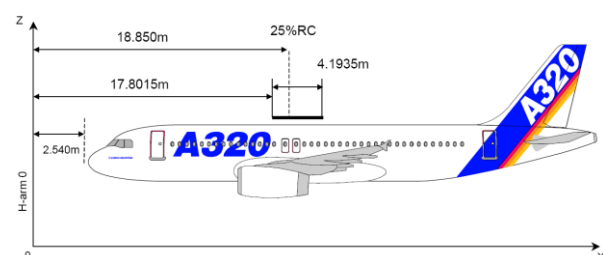
Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap. Pelatihan WB di atas merupakan pra-penelitian. Selanjutnya penelitian dilakukan dengan pentahapan sebagai berikut:



Gambar 2. Pentahapan Penelitian

Fokus penelitian pada dasarnya adalah pembuatan model matematika untuk menentukan pusat gravitasi (*Center of Gravity*, disingkat CG, selanjutnya disebut CG) pesawat udara yang berisi muatan. Muatan ini sendiri terdiri dari berat awal pesawat udara sebagai *Dry Operating Weight* (disingkat DOW, selanjutnya disebut DOW) yang juga berkaitan dengan *Dry Operating Index* (disingkat DOI, selanjutnya disebut DOI) dan *Dry Operating Centre of Gravity* (disingkat DOCG, selanjutnya disebut DOCG), dan beban dari item-item kargo, bahan bakar, dan penumpang.

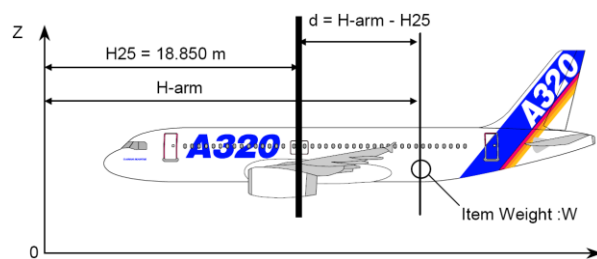
Model matematika ini sendiri berdasarkan ukuran fisik pesawat udara dan sistem koordinat rujukan yang ditetapkan untuk acuan perhitungan momen serta besaran lain yang terkait, seperti panjang kord rujukan (*Reference Chord*, disingkat RC, selanjutnya disebut RC) sebagaimana ditunjukkan gambar berikut:



Gambar 3. Sistem Koordinat Rujukan<sup>[2]</sup>

Pada gambar di atas, letak datum adalah 2.540 m di depan ujung hidung pesawat udara, panjang RC = 4.1935 m dengan jarak tepi depan RC dari datum adalah 17.8015 m, dan posisi 25%RC adalah 18.850 m dari datum.

Dengan prinsip momen M, tiap item dengan berat (*Weight*, disingkat W, selanjutnya disebut W) mempunyai lengan momen yang besarnya didapat dengan dihitung posisinya dari datum sebagai H-arm dan diacukan pada posisi 25%RC sebagai H25. Jarak antara posisi item dan H25 disebut sebagai d sebagaimana ditunjukkan gambar berikut:



Gambar 4. Prinsip Momen<sup>[2]</sup>

Penentuan letak CG pada saat tanpa bahan bakar (*zero fuel*) ZFCG dan saat lepas landas (*take off*) TOCG dapat dicari dari persamaan-persamaan berikut<sup>[2]</sup>:

$$ZFCG = \frac{M_{emptyaircraft} + M_{onboardpassenger} + M_{loadedcargo}}{W_{zerofuel}}$$

$$TOCG = \frac{M_{emptyaircraft} + M_{onboardpassenger} + M_{loadedcargo} + M_{fuelonboard}}{W_{takeoff}}$$

Penggunaan indeks juga bisa dilakukan untuk penyederhanaan yang merepresentasikan berat dan lokasi tiap bagian sebagaimana ditunjukkan persamaan berikut<sup>[2]</sup>:

$$Index_{item} = I_{item} = \frac{M_{item}}{C} + K = \frac{W \times (H - arm - H)}{C} + K$$

Dengan demikian, indeks pada saat tanpa bahan bakar ZFIndex dan saat lepas

landas TOIndex dapat juga digunakan dari persamaan-persamaan berikut<sup>[2]</sup>:

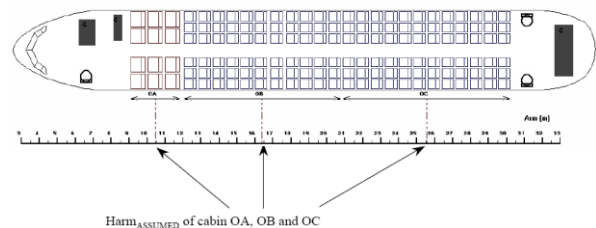
$$ZFI = I_{emptyaircraft} + \Delta I_{onboardpassenger} + \Delta I_{loadedcargo}$$

$$TOI = I_{emptyaircraft} + \Delta I_{onboardpassenger} + \Delta I_{loadedcargo} + \Delta I_{fuelonboard}$$

Penelitian dibatasi untuk konfigurasi tempat duduk campuran yang terdiri dari:

- 1 klas bisnis (kabin OA)
  - 2 klas ekonomi (kabin OB dan OC)
- dengan lengan momen kabin rata-rata sebagaimana ditunjukkan gambar berikut:

Cabin	Harm <sub>ASSUMED</sub> = average cabin lever arm (m)
OA (1 to 3)	10.440
OB (4 to 15)	16.389
OC (16 to 27)	25.535



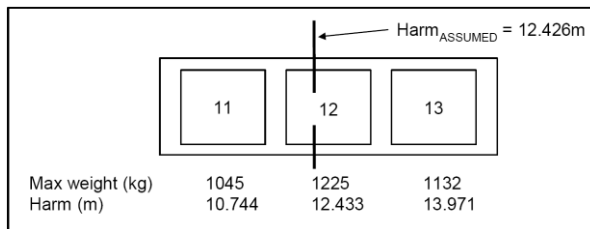
Gambar 5. Lengan Momen Kabin<sup>[2]</sup>

Sesuai jenis dan konfigurasi pesawat udara, terdapat data berat maksimum kargo dalam kompartemen-kompartemen yang ada (1, 3, 4, dan 5) sebagaimana ditunjukkan tabel berikut:

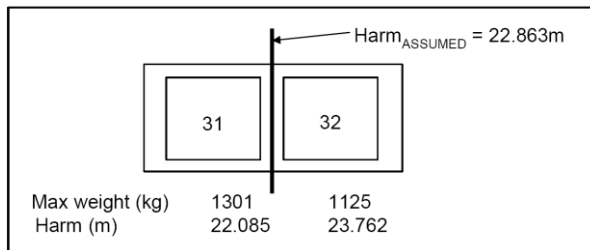
Tabel 1. Lengan Momen Kompartemen Kargo<sup>[2]</sup>

Compartment	Harm <sub>ASSUMED</sub> = Average lever arm (m)
1	12.426
3	22.863
4	26.258
5	29.325

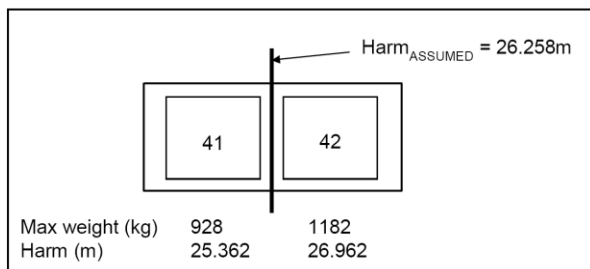
Data di atas didapat dari perhitungan tiap kompartemen kargo sebagaimana ditunjukkan gambar-gambar berikut:



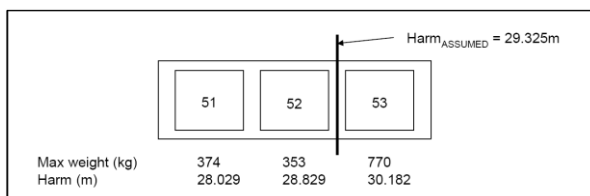
Gambar 6. Kompartemen Kargo 1<sup>[2]</sup>



Gambar 7. Kompartemen Kargo 3<sup>[2]</sup>



Gambar 8. Kompartemen Kargo 4<sup>[2]</sup>



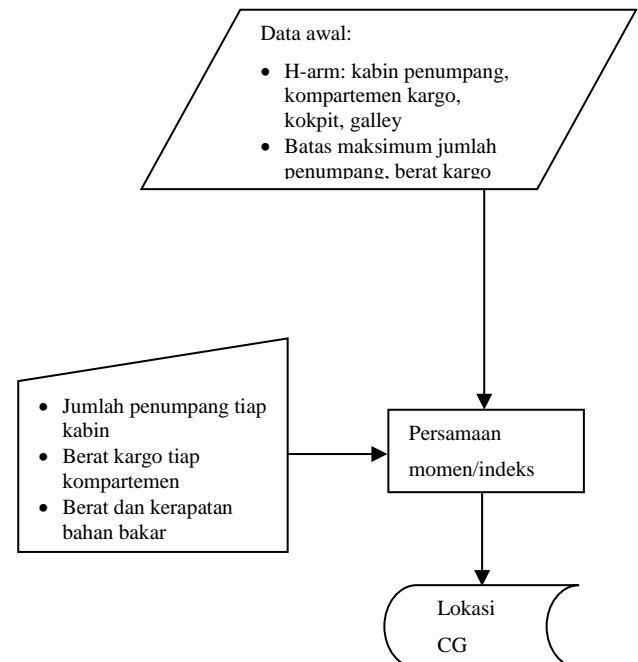
Gambar 9. Kompartemen Kargo 5<sup>[2]</sup>

Selain data di atas, ditambahkan juga data lengan momen untuk posisi pilot yaitu 5.085 m, *galley* depan yaitu G1 dan G2A berturut-turut sebesar 6.645 m dan 8.357 m, serta *galley* belakang yaitu G5 sebesar 33.162 m.

Perhitungan letak CG dilakukan dengan menggunakan data-data di atas sebagai data awal yang memang dimiliki pesawat udara secara bawaan, antara lain H-arm dari semua kabin penumpang, semua kompartemen kargo, kokpit, dan *galley* depan serta belakang. Sebagai masukan (input) yang dapat bervariasi dalam penerbangan adalah jumlah penumpang

tiap kabin, berat kargo tiap kompartemen, dan berat serta kerapatan bahan bakar.

Alur perhitungan letak CG ditunjukkan oleh diagram berikut:



Gambar 10. Diagram Alir Perhitungan Lokasi CG

## Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini diasumsikan berat penumpang adalah 84 kg untuk penerbangan regular (termasuk 6 kg berat bagasi yang dibawa ke dalam kabin) sesuai rekomendasi dokumen JAR-OPS 1 Subpart J<sup>[2]</sup>. Adapun berat awak kabin adalah 75 kg (termasuk 3 kg berat bagasi yang dibawa) dan berat awak kokpit adalah 85 kg (termasuk 3 kg berat bagasi yang dibawa).

Sebagai acuan nilai, diambil contoh yang diberikan dalam dokumen WBM<sup>[2]</sup>, di mana diasumsikan bahwa DOW sebesar 43,500 kg sedangkan DOCG adalah 8.90 m.

Data muatan yang diberikan adalah:

- Kompartemen kargo 1 = 1,000 kg
- Kompartemen kargo 3 = 2,000 kg
- Kompartemen kargo 4 = 500 kg
- Kompartemen kargo 5 = 200 kg
- Kabin OA = 10 penumpang
- Kabin OB = 50 penumpang

- Kabin OC = 60 penumpang
- Berat bahan bakar = 14,000 kg
- Kerapatan bahan bakar = 0.80 kg/l

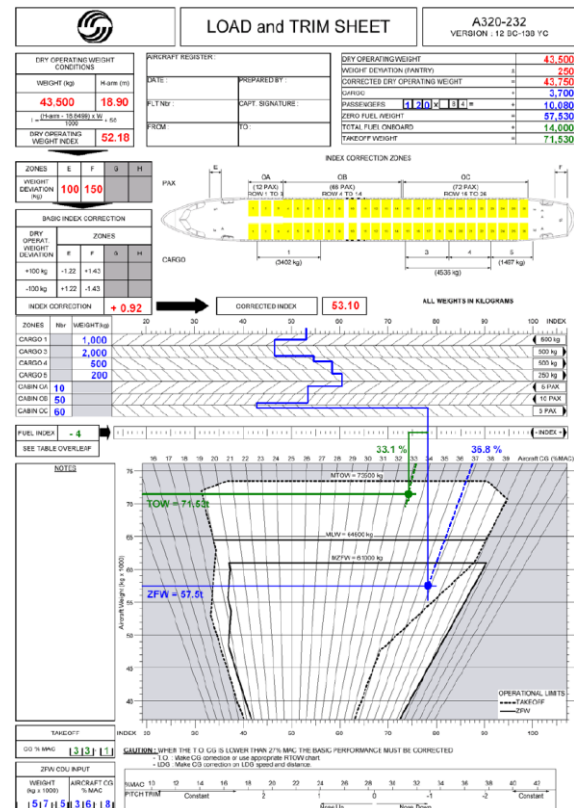
Dalam perhitungan, diperlukan juga data indeks bahan bakar sebagaimana ditunjukkan potongan data pada tabel berikut:

Tabel 2. Indeks Bahan Bakar<sup>[2]</sup>

WEIGHT (kg)	DENSITY (kg/l)
	0.785
3500	+1
4000	+1
4500	+0
5000	+0
5500	-1
6000	-1

Dalam WBM, diberikan juga koreksi-koreksi akibat simpangan-simpangan yang mungkin terjadi dari beberapa sumber, terutama dari item-item muatan yang terlibat.

Dalam dokumen WBM, diberikan hasil dalam LTS sebagai berikut:



Gambar 11. LTS pada Contoh dalam WBM<sup>[2]</sup>

Model matematika yang dikembangkan pada dasarnya memberikan hasil yang sejalan, tetapi terdapat selisih-selisih. Salah satu sebab yang memungkinkan terjadinya hal ini adalah karena model matematika yang dikembangkan tidak menyertakan koreksi-koreksi sebagaimana yang terdapat dalam WBM.

Selain itu, pembulatan-pembulatan yang dilakukan secara otomatis oleh Excel juga ikut berkontribusi memungkinkan terjadinya selisih-selisih tersebut.

## Kesimpulan

Pada dasarnya model matematika yang dikembangkan untuk perhitungan berat dan keseimbangan pesawat udara menggunakan Excel ini dapat diterapkan. Namun karena masih terdapatnya selisih-selisih dari hasil perbandingan dengan contoh yang ada dalam WBM, perlu ditambahkan koreksi-koreksi yang diperlukan.



---

**Referensi**

- [1] Flight Standards Service. FAA-H-8083-1A, Aircraft Weight and Balance Handbook. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Airmen Testing Standards Branch, AFS-630, P.O. Box 25082, Oklahoma City, OK 73125, 2007.
- [2] Airbus Training & Flight Operations Support and Services. A320 FAMILY WEIGHT AND BALANCE ENGINEER COURSE, BALANCE CHART DESIGN TRAINING MANUAL. AIRBUS S.A.S, 1, rond-point Maurice Bellonte 31707 Blagnac Cedex FRANCE, 2005.
- [3] Flight Operations Support & Line Assistance. Getting to Grips with Weight and Balance. Customer Services Airbus.
- [4] Tim Dosen PK-MIPA Bidang Matematika. KU1180 Pengantar Keilmuan MIPA: PEMODELAN MATEMATIKA, Oktober 2012.
- [5] Ir. Djoko Luknanto, M.Sc., Ph.D. Bahan kuliah Hidraulika Komputasi: MODEL MATEMATIKA. Jurusan Teknik Sipil FT UGM Yogyakarta, Februari 2003.
- [6] Setijo Bismo. Seri Mata Kuliah PEMODELAN dan MATEMATIKA TERAPAN: PRINSIP DASAR PEMODELAN dan MODEL MATEMATIS.
- [7] Christopher Teh Boon Sung. Building Mathematical Models in Excel, A Guide for Agriculturists. Universal-Publishers Boca Raton, 2015.
- [8] Joseph P. Hasley, Ph.D. Mathematical models and simulations in Excel: the case of the Marion Investment Company. Metropolitan State University of Denver.
- [9] GPA GROUP, LIMITED. 737-400 WEIGHT AND BALANCE CONTROL AND LOADING MANUAL. Boeing Commercial Airplane Group, Weight Engineering Organization, P.O. Box 3707 Seattle, Washington 98124, 11 Jun 2009.