

## **BAB III METODE PENELITIAN**

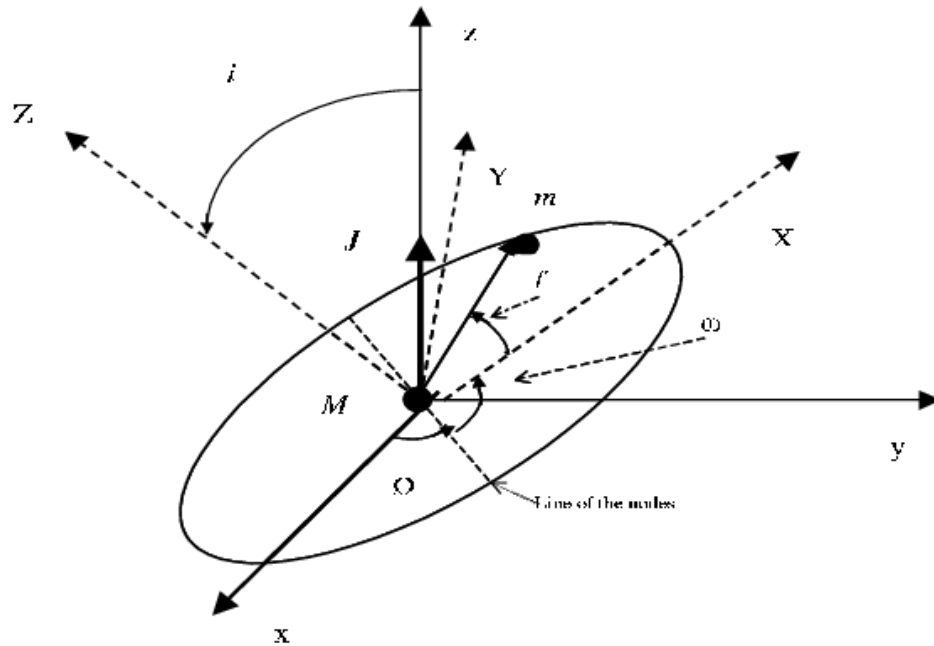
### **3.1. Metode Penelitian**

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan metode deskriptif analitik dengan pendekatan kuantitatif melalui komputasi numerik. Maksud dari pendekatan kuantitatif yaitu pendekatan yang digunakan dalam penelitian dengan cara mengukur indikator variabel penelitian sehingga diperoleh gambaran diantara variabel-variabel tersebut.

### **3.2. Sampel Data Penelitian**

Dengan mencari tahu parameter karakteristik yang dimiliki asteroid serupa nilai  $a$  (setengah sumbu panjang atau jarak rata-rata benda langit ke Matahari), nilai  $q$  (perihelion), nilai  $Q$  (aphelion), dan nilai  $H$  (Magnitudo absolut untuk asteroid). Diketahui karakteristik orbit keempat kelas utama asteroid dekat-Bumi ini adalah, kelas Apollo ( $a > 1$  au dan  $q < 0,017$  au), Amor ( $a > 1$  au dan  $1,017$  au  $< q < 1,3$  au), Aten ( $a < 1$  au dan  $Q > 0,983$ ), dan Atira ( $a < 1$  au dan  $Q < 0,983$ ), nilai  $H$  yang digunakan pada penelitian ini adalah  $H < 17,75$  untuk semua kelas asteroid dekat-Bumi, asteroid yang memiliki nilai  $H < 17,75$  ini adalah asteroid yang memiliki diameter antara 0,67 km – 1,5 km sehingga asteroid yang memiliki  $H < 17,75$  tidak akan terkikis habis saat melewati atmosfer Bumi.

Data objek-objek yang digunakan dalam skripsi ini diunduh dari JPL NASA *Small-Body Database* (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb-query.cgi>) pada 10 Maret 2016. Dengan melalui proses seleksi sehingga diperoleh data Matahari, Merkurius, Venus, Bumi, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus, Bulan, dan 3372 asteroid dekat-Bumi yang meliputi nama objek, waktu (tahun),  $a$  (au),  $e$  (au),  $i$  (derajat),  $\omega$ ,  $\Omega$ , dan  $M$  (derajat), dengan  $a$  merupakan setengah sumbu panjang atau jarak rata-rata benda langit ke Matahari,  $e$  merupakan eksentrisitas atau kelonjongan lintasan yang dimiliki oleh benda langit,  $i$  merupakan inklinasi atau tingkat kemiringan orbit terhadap bumi,  $\omega$  merupakan bujur perihelion,  $\Omega$  merupakan bujur simpul naik, dan  $M$  merupakan anomali rata-rata atau posisi benda langitnya.



**Gambar 1.** Gambar ilustrasi parameter yang digunakan (Iorio:2002)

### 3.3. Integrasi Numerik

Simulasi numerik dalam bentuk masalah N-benda (*N-body problem*) digunakan dalam penelitian ini. Komputasi orbit atas sampel data asteroid dekat-Bumi yang diperoleh dari laman <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb-query.cgi> dilakukan menggunakan paket *integrator* Swift\_RMVS4 yang merupakan versi terakhir dari paket Swift yang dikembangkan Levison & Duncan (1994). Paket program SWIFT ini menggunakan teknik integrasi *Regularized Mixed Variable Symplectic* (RMVS).

Regularisasi dalam algoritma ini merupakan sebuah proses matematika yang bertujuan menghilangkan singularitas dari persamaan gerak benda (dalam bentuk persamaan diferensial) yang hendak dipecahkan. Varian algoritma RMVS4 yang digunakan dalam penelitian ini merupakan versi yang mampu menghitung peristiwa papasan dekat antara asteroid dengan planet-planet secara lebih teliti.

Proses seleksi yang hanya menyertakan asteroid dekat-Bumi dari keempat kelas (Amor, Apollo, Aten, dan Atira), baik yang sudah bernomor maupun belum dengan orbit yang telah diketahui dengan sangat baik (*condition code*  $U=0$ ; bersesuaian dengan batas galat orbit kurang dari  $1''/\text{dekade}$ ), telah berhasil diperoleh sebanyak 3372 sampel asteroid. Keterbatasan paket *integrator* untuk melakukan integrasi orbit 3372 sampel asteroid secara sekaligus, sehingga

membuat penelitian ini harus melakukan pemecahan jumlah. Untuk mengatasinya, 3372 sampel asteroid yang disusun berdasarkan radius (dari terkecil hingga terbesar) dipecah ke dalam empat kelompok (*batch*), dengan pengaturan *batch1* sampai dengan *batch3* masing-masing terdiri atas 1000 asteroid dan *batch4* terdiri atas 372 asteroid dengan rentang radius pada *batch1* sebesar 3 sampai 201 m, rentang radius pada *batch2* sebesar 201 sampai 379 m, rentang radius pada *batch3* sebesar 372 sampai 906 m, dan rentang radius pada *batch4* sebesar 907 sampai 15830 m.

Proses komputasi dijalankan dengan memanfaatkan fasilitas PC (*Processor Intel(R) Core(TM) i3-3240T CPU @2,90 GHz, RAM 4,00 GB, 64 bit operating system*) yang tersedia di Laboratorium Komputasi Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA – Universitas Pendidikan Indonesia. Proses komputasi dijalankan hingga  $5 \times 10^6$  tahun ke depan menggunakan model Tata Surya dengan 10 benda masif (Matahari dan kedelapan planet, Merkurius hingga Neptunus, serta Bulan yang diperlakukan sebagai benda mandiri). Setiap *batch* dijalankan untuk kelipatan  $5 \times 10^6$  tahun, sehingga akan diperoleh hasil keluaran (*output*) komputasi *batch1* hingga *batch4* pada tiap kelipatan  $5 \times 10^6$  tahun. Seluruh *batch* dijalankan dengan pengaturan yang sama, yaitu menggunakan langkah waktu (*timestep*)  $10^{-3}$  tahun ( $\sim 9$  jam) dan hasil komputasi dicuplik setiap  $10^3$  tahun. Jejak evolusi orbit sampel asteroid diikuti hingga ada yang tereliminasi karena menumbuk Matahari, terlempar menjauh dari Matahari hingga  $a > 100$  au, atau mengalami tumbukan dengan planet-planet. Penelitian ini hanya menyertakan interaksi gravitasi dalam meninjau evolusi orbit asteroid melalui paket *integrator* yang digunakan. Interaksi gravitasi hanya terjadi antar-benda masif dan antar-benda masif dengan asteroid, namun tidak untuk antar-asteroid yang dianggap sebagai benda tak bermassa.

Salah satu cara untuk memperoleh probabilitas tumbukan antara dua orbit heliosentrik adalah dengan mengestimasi nilai laju tumbukan  $f$  (dalam satuan:  $\text{tahun}^{-1}$ ) melalui tumbukan yang diamati secara langsung di dalam simulasi numerik selama waktu  $t$ . Hanya saja tumbukan antara asteroid dengan planet merupakan peristiwa yang jarang dijumpai dalam simulasi numerik, sehingga untuk menghindari problem “*small number statistics*” di dalam penelitian ini kejadian

tumbukan diidentifikasi menggunakan kriteria MOID (*Minimum Orbit Intersection Distance*)  $< R_c$  (radius tangkapan gravitasi planet). Nilai  $R_c$  dihitung dari:

$$R_c = R_p \sqrt{1 + \left(\frac{V_{esc}}{V_\infty}\right)^2} \quad (3-1)$$

dengan  $R_p$  menyatakan radius fisik planet,  $V_{esc}$  kelajuan lepas di permukaan planet, dan  $V_\infty$  kelajuan asteroid saat berada di jarak yang jauh dari planet tersebut.

Penggunaan MOID untuk memperoleh kebolehjadian tumbukan dapat dijumpai dalam sejumlah literatur (JeongAhn & Malhotra (2015, 2017); Rickman dkk., (2014, 2017)). Perhitungan MOID dilakukan dengan memanfaatkan metode baru menggunakan prosedur numerik dan iteratif dari Wiśniowski & Rickman (2013) untuk sembarang pasangan orbit heliosentrik. Penggunaan nilai MOID mengizinkan untuk menyertakan pula dua orbit heliosentrik yang tidak berpotongan, yang dalam metode konvensional dianggap memiliki nilai probabilitas tumbukan nol (0).

Untuk  $N$  asteroid (proyektil) dan satu planet (target) tertentu, nilai kebolehjadian tumbukan intrinsik  $P_i$  dapat diperoleh dari banyaknya MOID yang terjadi antara seluruh asteroid dengan planet tersebut (dinyatakan sebagai  $M$ ) untuk suatu jarak yang kurang dari nilai tertentu  $r$  selama selang waktu  $t$  yang ditinjau (Galad, 2005), yaitu melalui persamaan:

$$P_i = \frac{M}{Nt^2} \quad (3-2)$$

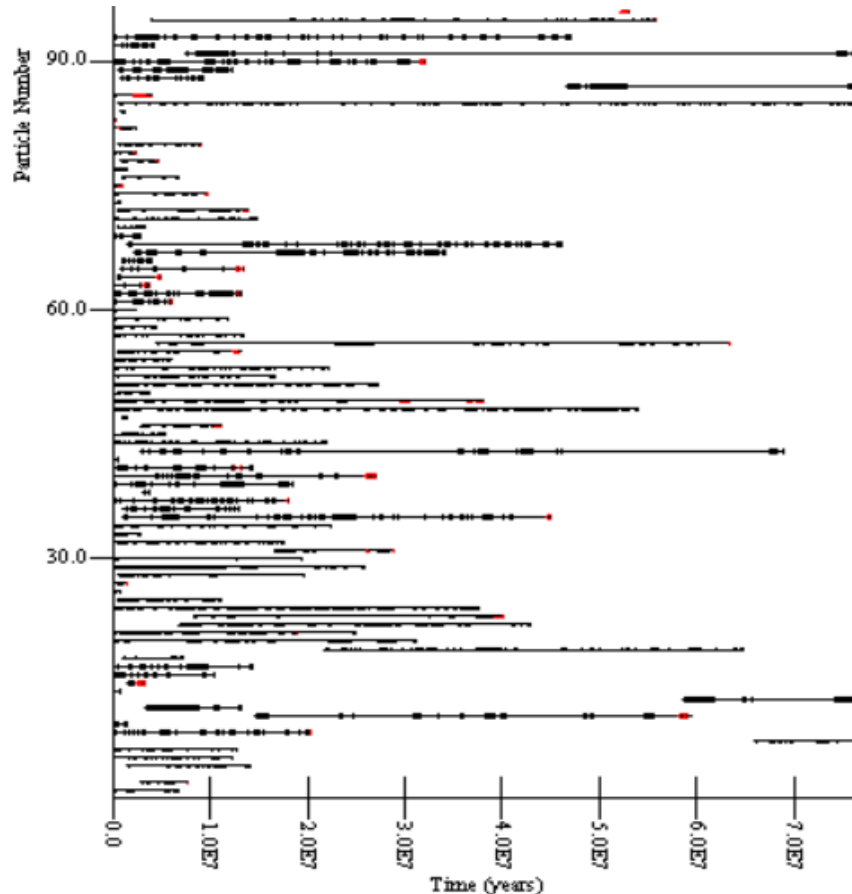
Sementara, laju tumbukan  $f$  per asteroid dengan suatu planet dapat diperoleh dari informasi  $P_i$  melalui hubungan:

$$f = P_i R_c^2 \quad (3-3)$$

### 3.4. Pemrograman

Pemrograman dilakukan untuk menganalisis lebih detail pola resonansi objek dengan planet Bumi dengan menggunakan metode *Finding Particles in Resonance* yang terdapat pada program SwiftVis. Program ini akan membantu dalam

menemukan partikel-partikel yang memiliki resonansi N:1 terhadap planet tertentu dan menghasilkan plot yang menunjukkan informasi tersebut. Dalam penelitian ini dilakukan modifikasi program tersebut untuk mencari resonansi 1:1 dan 1:2 terhadap Bumi.



**Gambar 2.** Contoh Plot yang menunjukkan resonansi objek (<http://cs.trinity.edu/~mlewis/SwiftVis/ResonanceTutorial.html>)

Gambar 3. merupakan contoh plot yang menunjukkan resonansi objek, sumbu x menunjukkan waktu komputasi dan sumbu y menunjukkan identitas partikel. Ketika suatu objek mengalami resonansi pada rentang waktu tertentu maka akan terlihat dari hasil plot dengan adanya garis memanjang dalam rentang waktu tersebut.

### 3.5. Analisis Data

#### 3.5.1 Analisis Fluks Masuk dari Kawasan Dekat-Bumi menuju *Sink*

Memanfaatkan data populasi sampel asteroid dekat-Bumi dari dari awal waktu komputasi hingga akhir waktu komputasi, analisis fluks masuk dari kawasan

dekat-Bumi menuju ke *sink* dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Microsoft Excel* dengan memanfaatkan fitur *solver* dan *fitting curve*. Dengan memplot data populasi sampel yang berkurang akan terlihat populasi asteroid dekat-Bumi mengalami penurunan dari awal waktu komputasi hingga akhir waktu komputasi, dan dilakukan pencocokan kurva (*fitting curve*) pada plot yang telah dihasilkan.

### 3.5.2 Analisis Frekuensi Tumbukan

Memanfaatkan hasil estimasi nilai laju tumbukan  $f$  (dalam satuan: tahun<sup>-1</sup>) melalui tumbukan yang diamati secara langsung di dalam simulasi numerik selama waktu  $t$ . Di dalam penelitian ini kejadian tumbukan diidentifikasi menggunakan kriteria  $\text{MOID} < R_c$  (radius tangkapan gravitasi planet). Nilai  $R_c$  diperoleh menggunakan Persamaan 3-1 dengan menggunakan nilai  $V_\infty$  yang merujuk pada nilai yang diperoleh David A. Minton dan Renu Malhotra (2009). Nilai Jarak minimum orbit atau dalam bidang astronomi biasa dikenal *Minimum Orbit Intersection Distance* (MOID) merupakan ukuran yang digunakan dalam astronomi untuk menilai potensi pendekatan yang dekat atau tabrakan antara objek astronomi. MOID didefinisikan sebagai jarak antara titik-titik terdekat dari orbit dua benda. Suatu objek yang berpotensi berbahaya, yaitu objek yang menimbulkan resiko yang mungkin terhadap Bumi jika jarak antara bumi dengan objek tersebut kurang dari nilai radius tangkap gravitasi Planet  $R_c$ . Menghitung laju tumbukan asteroid terhadap planet dengan menggunakan program IDL *workbench* yang merupakan adopsi dari program Fortran menggunakan algoritma dari Wisniowski & Rickman (2013).

Nilai kebolehjadian tumbukan intrinsik  $P_i$  dapat diperoleh dari banyaknya MOID yang terjadi antara seluruh asteroid dengan planet tersebut untuk suatu jarak yang kurang dari nilai tertentu  $r$  selama selang waktu  $t$  yang ditinjau, menggunakan Persamaan 3-2, sehingga laju tumbukan asteroid dekat-Bumi dengan suatu planet diperoleh melalui persamaan 3-3. Kebalikan nilai  $f$  menyatakan *collisional lifetime*, yaitu skala waktu sebuah proyektil bertumbukan dengan objek target tertentu. Dengan memanfaatkan nilai  $f$  yang diperoleh untuk tiap planet terestrial dalam

rentang waktu komputasi selama  $5 \times 10^6$  tahun sehingga frekuensi tumbukan asteroid dekat-Bumi dapat diketahui.

### 3.5.3 Analisis Pengaruh Resonansi

Analisis pengaruh resonansi pada evolusi orbit dilakukan dengan menganalisis pola resonansi yang dialami objek dengan planet Bumi dengan menggunakan metode *Finding Particles in Resonance* yang terdapat pada program SwiftVis. Program ini akan membantu dalam menemukan partikel-partikel yang memiliki resonansi N:1 terhadap planet tertentu dan menghasilkan plot yang menunjukkan informasi tersebut. Merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh T. Gallardo (2006) yang menunjukkan bahwa resonansi yang paling dominan pada kawasan dekat-Bumi adalah resonansi 1:1 Bumi dan resonansi 1:2 Bumi sehingga dalam penelitian ini program akan mencari asteroid penumbuk Bumi yang memiliki resonansi 1:1 dan 1:2 terhadap Bumi.

Objek yang diduga berkemungkinan beresonansi 1:1 atau 1:2 dengan Bumi dianalisis kembali menggunakan metode *Fast Identification of Mean Motion Resonances – FAIR* (Forgacs-Dajka dkk., 2018), dengan memplot  $M$  atau  $M_p$  terhadap selisih  $\lambda$ , dengan  $\lambda = M + \varpi$ , dan  $\varpi = \omega + \Omega$ . Dengan  $\lambda$  merupakan rata-rata bujur orbital,  $M$  merupakan *mean anomaly*,  $M_p$  merupakan *mean anomaly* planet,  $\varpi$  merupakan garis bujur *perihelion* asteroid,  $\omega$  merupakan argumen *perihelion*, dan  $\Omega$  merupakan bujur titik nodal naik. Pemeriksaan ini dilakukan untuk memastikan objek tersebut benar beresonansi terhadap Bumi atau hanya karena memiliki periode yang kebetulan sama dengan Bumi. Hasil plot akan menghasilkan pita-pita yang jumlah perpotongannya pada sumbu x dan y menyatakan bilangan integer resonan bagi objek yang beresonansi.

## 3.6. Alur Penelitian

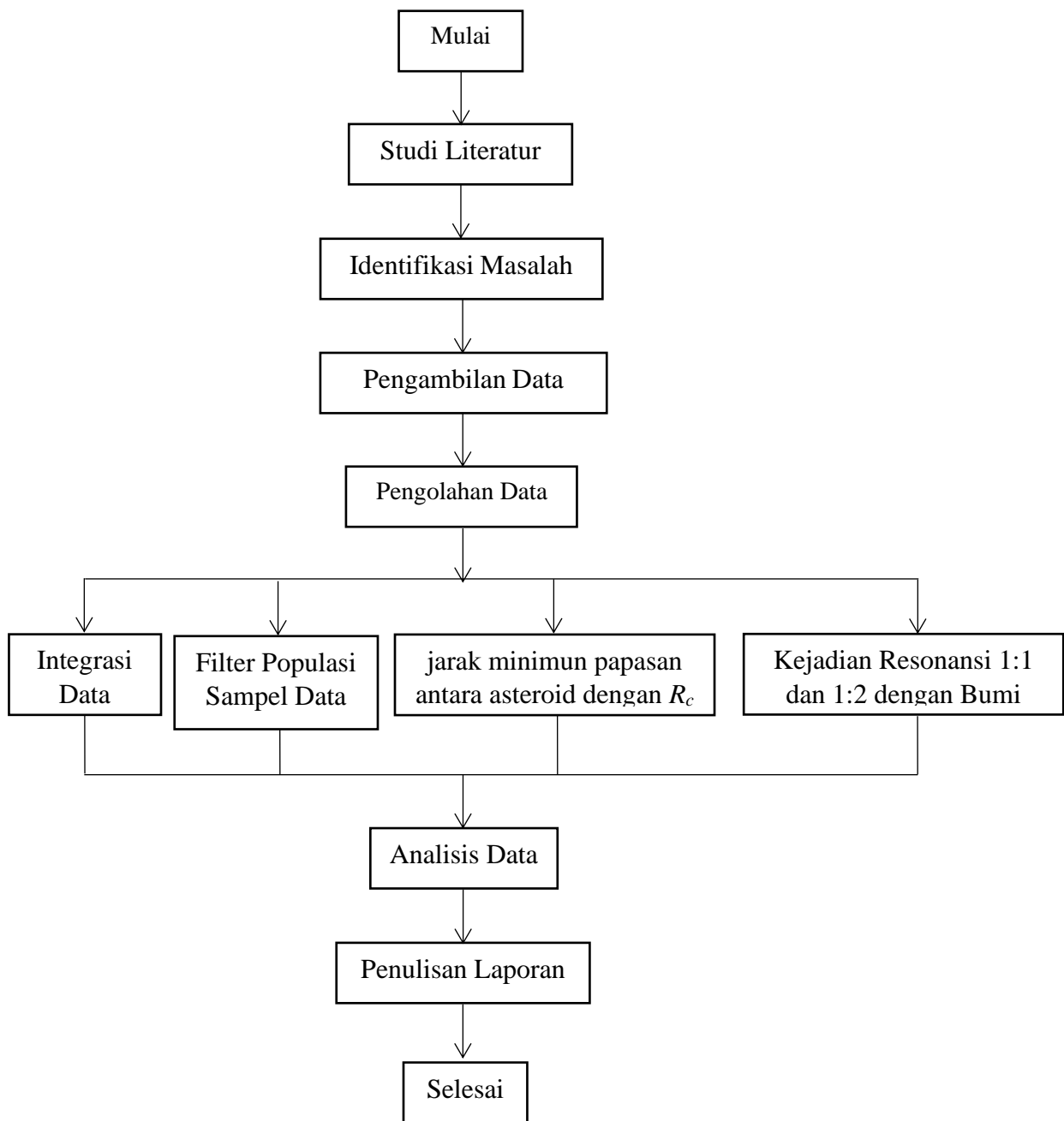
Alur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Mengkaji parameter-parameter asteroid dekat-Bumi dilakukan melalui jurnal, artikel, karya ilmiah, buku, ataupun media pembelajaran lainnya untuk lebih memahami setiap parameter yang digunakan dan berpengaruh pada penelitian ini.

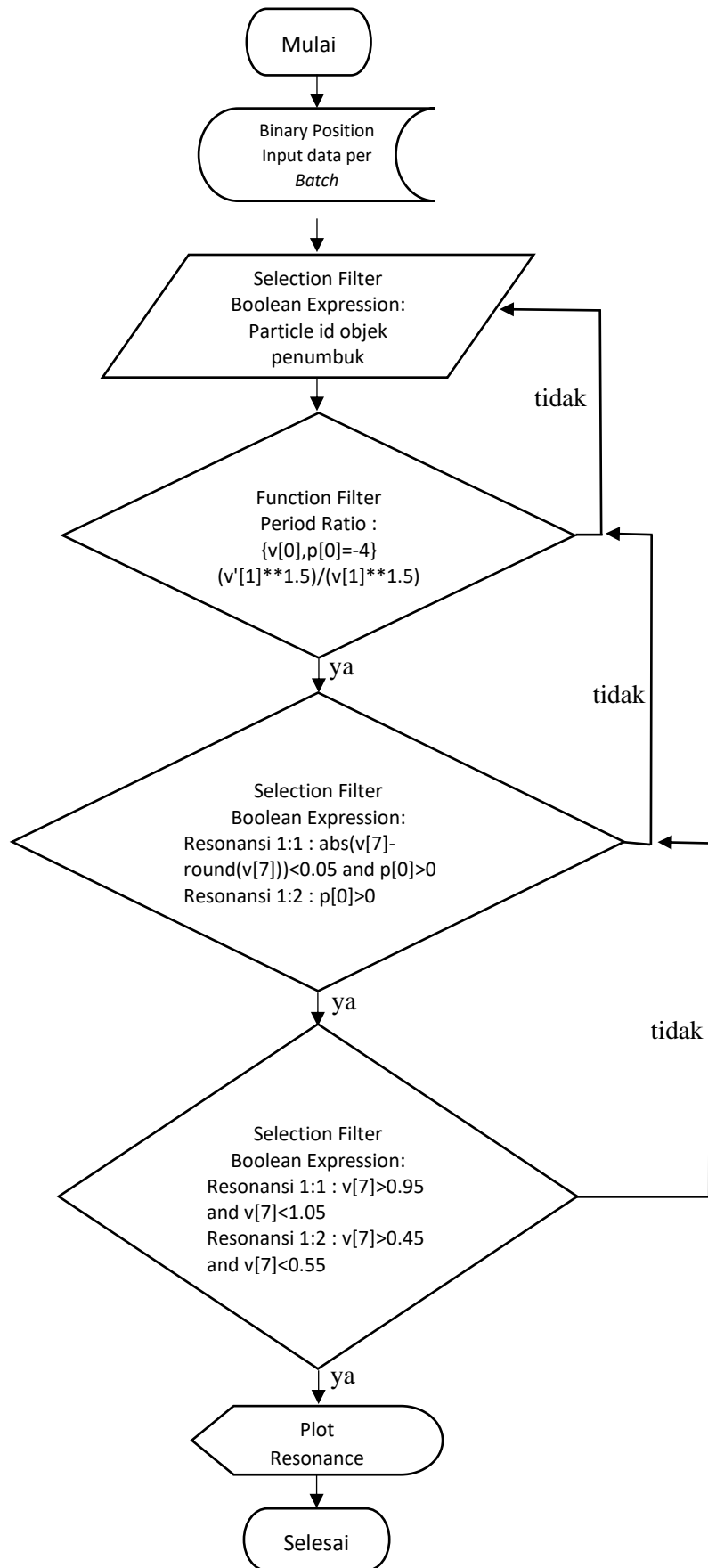
2. Mengidentifikasi masalah dengan mengkaji pemodelan dan penelitian mengenai evolusi orbit asteroid dan laju tumbukannya terhadap planet-planet terestrial yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya.
3. Mengambil data parameter asteroid yang diperlukan pada penelitian ini melalui situs JPL NASA *Small-Body Database* (<http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb-query.cgi>)
4. Pengolahan data dengan melakukan integrasi numerik menggunakan paket integrator Swift\_RMVS
5. Menganalisis data menggunakan perangkat lunak IDL *Workbench* dan, *Microsoft Excel*, dalam menganalisis fluks masuk dari kawasan dekat-Bumi menuju ke *sink* dan frekuensi tumbukan asteroid dekat-Bumi dengan planet-planet terestrial, dan menggunakan Swift Visual dalam menganalisis pengaruh resonansi orbit terhadap evolusi orbit asteroid dekat-Bumi dalam  $5 \times 10^6$  tahun.
6. Menyimpulkan hasil analisis yang telah diperoleh berdasarkan tujuan penelitian yang dilakukan.

Berikut diagram alur langkah-langkah penelitian yang dilakukan:





**Gambar 3.** Diagram alur langkah-langkah penelitian



**Gambar 4.** Diagram Alur Program Pemeriksaan Resonansi