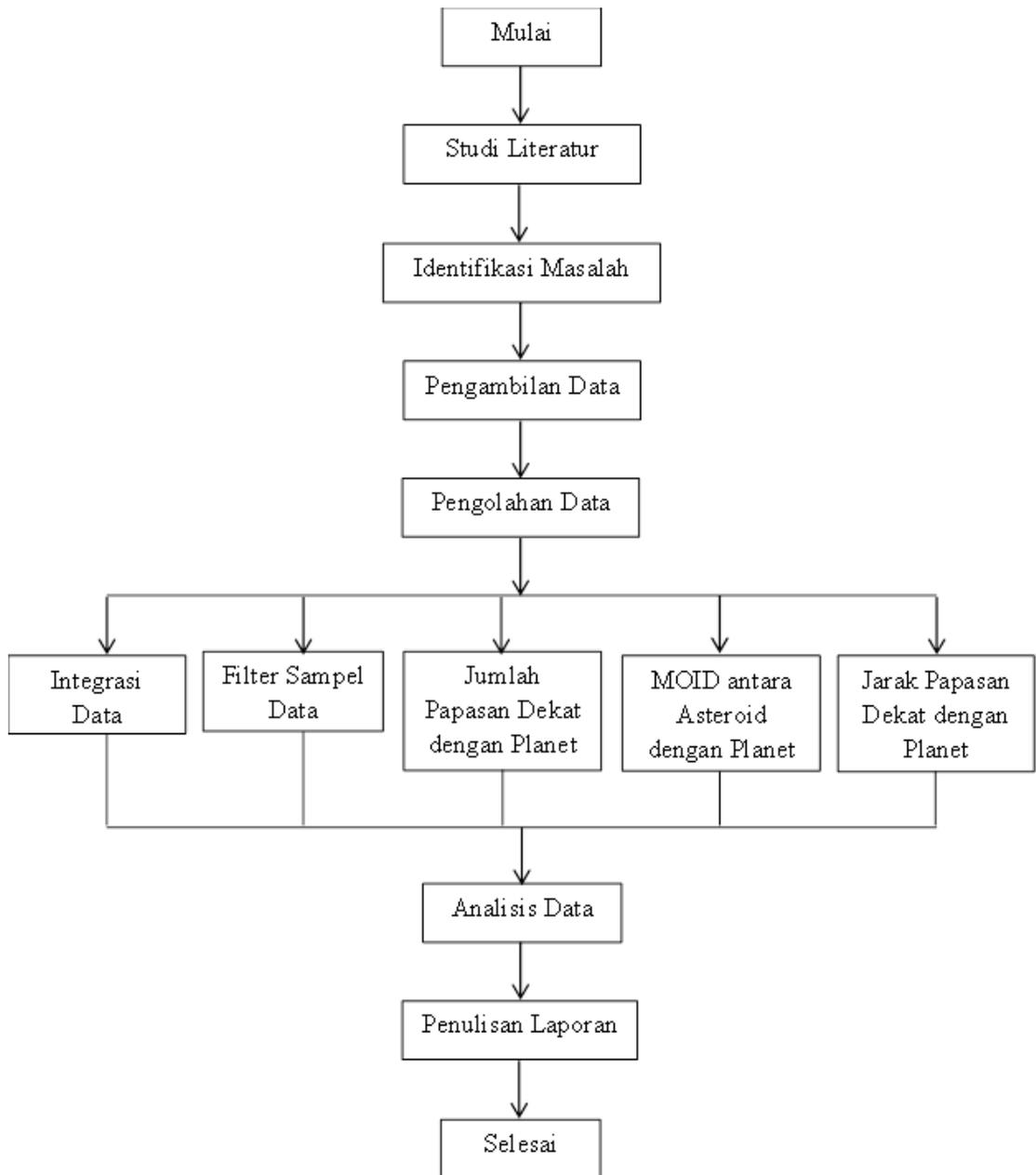


BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode deskriptif analitik dengan pendekatan kuantitatif melalui komputasi numerik. Prosedur penelitian yang akan dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Prosedur Penelitian

3.2 Sampel Data Penelitian

Data asteroid diperoleh dari laman https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi dengan melakukan proses seleksi asteroid dekat-Bumi pada kelas Amor, Apollo, Aten, dan Atira, dengan orbit yang diketahui sangat baik (*condition code* $U=0$; bersesuaian dengan batas galat orbit kurang dari $1''/\text{dekade}$). Diperoleh data sebanyak 4549 sampel asteroid (per 31 Mei 2020 atau MJD Epoch 59000); terdiri dari 1 sampel ADB kelas Atira, 278 sampel ADB kelas Aten, 2337 sampel ADB kelas Apollo, dan 1933 sampel ADB kelas Amor. Data yang diperoleh terdiri dari elemen-elemen orbit Keplerian tiap asteroid yaitu setengah sumbu panjang (a , satuan SA), eksentrisitas (e), inklinasi (i , satuan derajat), argumen periapse (ω , satuan derajat), bujur simpul naik (Ω , satuan derajat), dan anomali rata-rata (M , satuan derajat).

3.3 Integrasi Numerik Sampel Asteroid menggunakan Integrator EVORB15

Data yang sudah diperoleh kemudian diintegrasikan menggunakan Integrator EVORB15 yang dibagi ke dalam 10 *batch*. *Batch 1* sampai *batch 9* terdiri dari 500 objek, yaitu 9 objek masif (8 planet dan Bulan) dan 491 asteroid. *Batch 10* terdiri dari 139 objek, yaitu 9 objek massif dan 130 asteroid tersisa. Proses komputasi dilakukan hingga 5×10^6 tahun ke depan. Selain waktu integrasi tersebut, dilakukan juga komputasi dengan waktu integrasi 5×10^5 tahun ke belakang untuk mereproduksi hasil pekerjaan Binzel (2010).

Integrator EVORB15 melakukan simulasi numerik dalam bentuk masalah N-Benda. Parameter-parameter planet yang dimasukkan ke dalam integrator; yaitu element orbit ($a, e, i, \omega, \Omega, M$), massa, dan radius. Dan parameter-parameter asteroid yang dimasukkan ke dalam integrator, yaitu elemen orbit ($a, e, i, \omega, \Omega, M$). Integrator ini menggunakan algoritma Wisdom dan Holman (Holman, 1994) untuk mengintegrasikan persamaan gerak Hamiltonian, kemudian menggunakan algoritma BulirschStoer saat terjadi papasan dekat dengan planet dengan jarak kurang dari 3 kali radius Hill (Fernández dkk., 2002).

Menurut Holman (1994), persamaan *Hamiltonian* untuk sistem N-benda:

$$H = H_{Kepler} + H_{Interaksi} \quad (3.1)$$

H_{Kepler} merupakan Keplerian Hamilton yang merepresentasikan gerak Kepler tiap benda dan $H_{Interaksi}$ merepresentasikan interaksi gravitasi antara planet-planet.

$$H = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{p_i^2}{2m_i} - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{Gm_i m_{\odot}}{r_{i\odot}} - \sum_{0 < i < j} \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}} \quad (3.2)$$

p_i merupakan momentum planet massif, m_i adalah massa planet massif, m_{\odot} adalah total massa untuk sistem tata surya, $r_{i\odot}$ adalah jarak planet massif ke pusat massa sistem tata surya, m_j massa asteroid, dan r_{ij} adalah jarak planet massif ke asteroid. Persamaan diferensial *Hamiltonian* untuk gerak

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i \text{ dan } -\frac{\partial H}{\partial q_i} = \dot{p}_i \quad (3.3)$$

di mana q dan p merupakan posisi dan momentum. Persamaan 3.3 tidak memiliki solusi analitik maka solusi dapat diperoleh menggunakan penyelesaian numerik dengan memanfaatkan integrator yang dikembangkan oleh Tabare Gallardo.

Untuk memperoleh jarak terdekat asteroid ke planet (r_{ij}), Tabare Gallardo (salah satu pengembang integrator EVORB) menggunakan salah satu asumsi simplifikatif Öpik, yaitu papasan terjadi dekat simpul orbit asteroid (Włodarczyk, 2004), dengan nilai jarak terdekat dibawah 3 radius Hill (Levison & Duncan, 1994), seperti berikut :

$$r_{ij} < 3R_H \quad (3.4)$$

$$r_{ij} < 3a_p \left(\frac{m + m_{asteroid}}{3M} \right)^{1/3} \quad (3.5)$$

a_p adalah setengah sumbu planet, M adalah massa Matahari, m merupakan massa planet, dan $m_{asteroid}$ merupakan massa asteroid. Karena massa asteroid sangat kecil dibandingkan massa planet dan massa Matahari, maka massa asteroid diabaikan, seperti persamaan 3.6.

$$r_{ij} < 3a_p \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3} \quad (3.6)$$

r_{ij} merupakan selisih r_{planet} dengan $r_{asteroid}$, sehingga persamaan menjadi

$$r_{planet} - r_{asteroid} < 3a_p \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3} \quad (3.7)$$

dengan r_{planet} merupakan jarak planet ke Matahari, yaitu sejauh a_p (setengah sumbu panjang dari lintasan orbit planet mengitari Matahari atau jari-jari orbit planet ke Matahari)

$$a_p - r_{asteroid} < 3a_p \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3} \quad (3.8)$$

dan $r_{asteroid}$ merupakan jarak asteroid ke Matahari, dengan formula sebagai berikut :

$$r_{asteroid} = a[1 - e\cos(E)] \quad (3.9)$$

substitusi persamaan 3.10 ke 3.9

$$a_p - a[1 - e\cos(E)] < 3a_p \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3} \quad (3.10)$$

di mana a adalah setengah sumbu panjang asteroid, e adalah eksentrisitas asteroid, dan E adalah anomali eksentrisitas asteroid, diperoleh dari formula berikut :

$$\tan\left(\frac{E}{2}\right) = \sqrt{\left(\frac{1-e}{1+e}\right)} \times \tan\left(\frac{v}{2}\right) \quad (3.11)$$

di mana v merupakan anomali benar.

Integrator EVORB15 telah menyertakan koreksi relativistik selain efek gravitasi. Ketika nilai setengah sumbu panjang (a) atau perihelion (q) asteroid yang kecil maka integrator EVORB15 menyertakan koreksi relativistik. Formulasi yang digunakan seperti pada persamaan 2.10.

3.4 Minimum Orbit Intersection Distance (MOID)

MOID adalah jarak terdekat dua benda langit dalam orbit oskulasi. Untuk memperoleh MOID antara ADB tipe Q atau S dengan planet terestrial dapat

menggunakan metode prosedur numerik dan iteratif dari Wiśniowski dan Rickman (2013).

Untuk menghitung MOID dua orbit objek langit yang masing-masing dinyatakan dengan a, e, i, ω , dan Ω dilakukan dengan membuat salah satu objek langit ber-inklinasi 0 (nol). Walaupun demikian, metode ini dapat dimanfaatkan juga untuk 2 objek langit sembarang yang memiliki orbit dengan inklinasi tertentu terhadap ekliptika. Metode tersebut dilakukan dengan proses rotasi kerangka acuan maka kerangka acuan yang baru akan didefinisikan oleh salah satu objek. Proses ini tidak mengubah nilai MOID, hanya mengulangi perhitungan nilai elemen-elemen orbit objek langit yang berkaitan dengan sudut i, ω , dan Ω . Berdasarkan Gambar 3.2, terdapat salah satu objek langit yang menjadi referensi pada bidang meridional yang tegak lurus dengan bidang orbit objek langit lainnya. D_0 menyatakan Jarak objek A ($a_A, e_A, 0, 0, 0$) dan objek B ($a_B, e_B, i'_B, \omega'_B, \Omega'_B$). L_0 merupakan anomali benar untuk objek A dan v_0 merupakan anomali benar untuk objek B. Berikut rumus untuk menghitung jarak heliosentrik objek B (r_{B0})

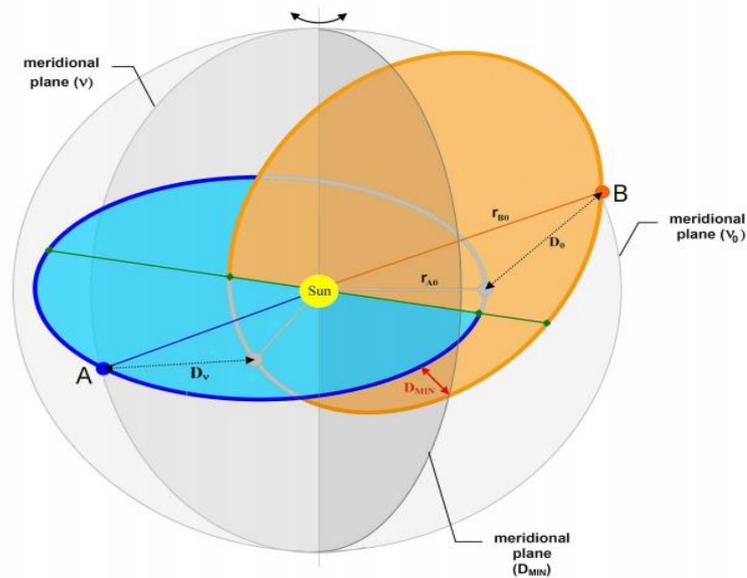
$$r_{B0} = \frac{a_B(1 - e_B^2)}{1 + e_B \cos v_0} \quad (3.12)$$

dimana a_B adalah setengah sumbu panjang objek B dan e_B merupakan eksentrisitas objek

vektor posisi dari objek B (X_{B0}, Y_{B0}, Z_{B0}) diperoleh menggunakan formula berikut

$$\begin{aligned} X_{B0} &= r_{B0} [\cos \Omega_B \cos(\omega_B + v_0) - \sin \Omega_B \sin(\omega_B + v_0) \cos i_B], \\ Y_{B0} &= r_{B0} [\sin \Omega_B \cos(\omega_B + v_0) - \cos \Omega_B \sin(\omega_B + v_0) \cos i_B], \\ Z_{B0} &= r_{B0} \sin(\omega_B + v_0) \sin i_B \end{aligned} \quad (3.13)$$

dimana Ω_B, ω_B , dan i_B masing-masing merupakan bujur simpul naik, argumen periapse, dan inklinasi dari objek B.



Gambar 3. 2 Ilustrasi Geometri Bidang Orbit Dua Objek Benda Langit (Wiśniowski & Rickman, 2013)

Berikut rumus untuk menghitung jarak heliosentrik objek A (r_{A0})

$$r_{A0} = \frac{a_A(1 - e_A^2)}{1 + e_A \cos L_0} \quad (3.14)$$

a_A dan e_A masing-masing adalah setengah sumbu panjang dan eksentrisitas dari objek A, dengan

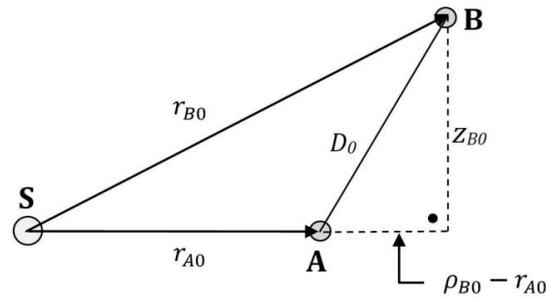
$$\cos L_0 = \frac{X_{B0}}{\rho_{B0}} \quad (3.15)$$

di mana ρ_{B0} sebagai berikut

$$\rho_{B0} = \sqrt{X_{B0}^2 + Y_{B0}^2} \quad (3.16)$$

sehingga dapat diperoleh nilai D_0 (Jarak objek A dan objek B) yaitu

$$D_0 = \sqrt{Z_{B0}^2 + (\rho_{B0} - r_{A0})^2} \quad (3.17)$$



Gambar 3. 3 Segitiga yang dibentuk Matahari, objek A dan objek B di bidang meridional yang ditetapkan oleh anomali benar (Wiśniowski dan Rickman, 2013)

Kemudian, akan dilakukan proses pemindaian jarak meridional D_v dengan perpindahan posisi kedua objek langit sebagai fungsi v . Semua minimum lokal jarak meridional D_m dapat diidentifikasi dengan melalui proses pemindaian untuk satu kali revolusi objek B dengan langkah Δv (12 radian sebagai nilai optimal). Kriteria yang digunakan untuk memperoleh minimum lokal yaitu nilai D_v kurang dari nilai sebelum dan sesudahnya dengan langkah Δv yang dipilih. Pada akhir proses pemindaian, setelah nilai D_m diketahui maka langkah selanjutnya memindahkan objek A dan B sepanjang lintasan orbitnya masing-masing sampai menemukan jarak terdekat antara kedua objek langit tersebut yang mungkin terjadi dan bukan jarak meridiannya. Berikut persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung MOID

$$\begin{aligned} r_A &= \frac{a_A(1 - e_A)}{1 + e_A \cos L'} \\ r_B &= \frac{a_B(1 - e_B)}{1 + e_B \cos v} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} X_A &= r_A \cos L, \\ Y_A &= r_A \sin L, \\ Z_A &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} X_B &= r_B [\cos \Omega_B \cos(\omega_B + v) - \sin \Omega_B \sin(\omega_B + v) \cos i_B], \\ Y_B &= r_B [\sin \Omega_B \cos(\omega_B + v) - \cos \Omega_B \sin(\omega_B + v) \cos i_B], \\ Z_B &= r_B \sin(\omega_B + v) \sin i_B \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$D = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2} \quad (3.21)$$

3.5 Pengolahan Data

3.5.1 Pengolahan Data Jumlah Papasan Dekat dengan Planet Terrestrial yang dialami ADB Tipe Q-kompleks dan S-kompleks

Salah satu file keluaran hasil integrasi sampel asteroid menggunakan integrator EVORB15 adalah file *encuent.sal*. Dari file tersebut bisa diperoleh jumlah kejadian papasan ADB tipe Q-kompleks dan S-kompleks dengan planet terrestrial. Dengan menggunakan fungsi COUNTIFS pada Ms.Excel dapat mempercepat perhitungan jumlah papasan yang dialami satu asteroid ADB tipe Q atau S dengan salah satu planet terrestrial. Fungsi COUNTIFS digunakan untuk menghitung jumlah sel yang berisi data yang sesuai dengan beberapa kriteria data. Jika semua kriteria terpenuhi maka sel iterasi akan dimasukkan ke dalam perhitungan, begitupun dengan iterasi selanjutnya. Misalnya kriteria yang dimasukkan adalah partikel (asteroid) nomor 253 yang berpapasan dengan planet nomor 3 (Bumi) seperti yang tertera pada Gambar 3.4.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Dm/R	Vp(K/s)	energ	Pla	Par	TIPE	ASTEROID	PAPASAN DEKAT SEMUA PLANET	MERKURIUS	VENUS	BUMI	BULAN	MARS	JUPITER		
2	284.5	17.07	6.4742	2	272	Sq	253		4	0	0	4	0	0	0	
3	468.1	7.03	1.0925	3	470											
4	222.2	10.35	2.3746	2	72	S	494		6	0	0	2	1	3	0	
5	50.5	42.48	40.1018	3	442	Sk	113		8	0	0	5	1	2	0	
6	77.9	43.28	41.672	4	442											
7	338.6	10.77	2.5507	3	244											

Gambar 3. 4 Formula Excel untuk memperoleh jumlah papasan dekat antara satu asteroid dengan satu planet

3.5.2 Pengolahan Data Jarak Papasan ADB tipe Q-kompleks dan S-kompleks dengan Planet Terrestrial

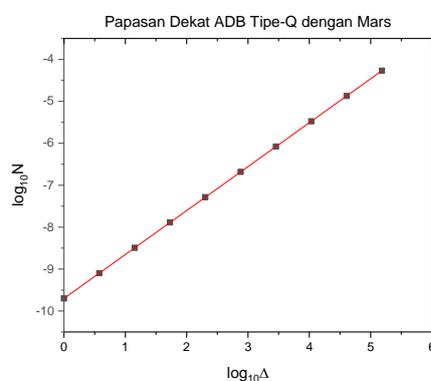
File keluaran yang digunakan untuk memperoleh data jarak papasan adalah file *encuent.sal*. Dengan menggunakan formula IFERROR, INDEX, SMALL, IF, dan ROW dapat mempercepat proses filter/seleksi data yang dibutuhkan yaitu jarak papasan dekat antara ADB tipe Q atau S dengan salah satu planet terrestrial.

Contoh memfilter data ADB tipe Q-kompleks dengan ID asteroid 113 maka formula excel yang digunakan seperti pada Gambar 3.5

U2		fx {=IFERROR(INDEX(A:F;SMALL(IF(\$F\$2:\$F\$50407=\$S\$1;ROW(\$F\$2:\$F\$50407));ROW(1:1));1);"")}															
	B	C	D	E	F	G	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z		
1	Dm/R	Vp(K/s)	energ	Pla	Par				113	Planet	Wkt Papasan	Jarak Terdekat	Kecepatan		494	Planet	Wk
2	284.5	17.07	6.4742	2	272				3	312.5776	474.8	14.38				5	
3	468.1	7.03	1.0925	3	470				3	480.8891	454.2	14.28				5	
4	222.2	10.35	2.3746	2	72				5	491.4256	458.9	19.02				5	

Gambar 3. 5 Formula Excel untuk menyeleksi data waktu papasan dekat dengan planet yang dialami asteroid

Kemudian dibuat histogram jarak papasan, agar mengetahui jarak papasan ADB tipe Q dan S yang memiliki frekuensi terbanyak. Selain itu juga akan dibuat grafik distribusi jarak minimum ADB tipe Q-kompleks dan S-kompleks dengan planet terestrial berdasarkan data jarak papasannya, sebagai contoh seperti pada Gambar 3.6, grafik dibuat dengan menggunakan *software* Origin Pro 2019b. Dengan melakukan *fitting* pada garis linear yang terdapat dalam Gambar 3.6 dapat diperkirakan frekuensi papasan dekat untuk jarak yang lebih ekstrim dengan planet.



Gambar 3. 6 Plot rata-rata jumlah papasan dekat terhadap jarak papasan ADB tipe Q-kompleks dengan planet Mars, untuk mengetahui distribusi jarak minimum ADB tipe Q-kompleks dengan planet Mars.

Kemudian akan dihitung kebolehjadian tumbukan intrinsik (P_i) untuk memperoleh frekuensi (f) kedekatan dan frekuensi (f) tumbukan per asteroid dengan suatu planet. P_i dapat diperoleh menggunakan persamaan 3.22 (Galad, 2005).

$$P_i = \frac{M}{Ntr^2} \quad (3.22)$$

dimana M merupakan banyaknya peristiwa papasan dekat antara seluruh sampel ADB tipe Q-kompleks atau S-kompleks dengan salah satu planet terestrial dengan jarak kurang dari r , N merupakan jumlah sampel ADB tipe Q-kompleks ($N=70$ asteroid) atau S-kompleks ($N=98$ asteroid), dan t adalah selang waktu integrasi yang ditinjau. Pada penelitian ini digunakan r sejauh R_{Hill} planet yang berdasarkan perhitungan (Chebotarev, 1964). Frekuensi (f) kedekatan dan frekuensi tumbukan diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.23 (Galad, 2005).

$$f = N(< H)P_iR_c^2 \quad (3.23)$$

R_c merupakan radius tangkapan gravitasi planet. Untuk memperoleh frekuensi kedekatan, R_c yang digunakan merupakan nilai batas r yang sudah ditetapkan sebelumnya ($R_c = R_{Hill}$). Dan untuk frekuensi tumbukan, nilai R_c dihitung dari persamaan 3.24 (Galad, 2005).

$$R_c = R_p \sqrt{1 + \left(\frac{v_{esc}}{v_{enc}}\right)^2} \quad (3.24)$$

Dengan R_p menyatakan jari-jari khatulistiwa suatu planet, v_{esc} merupakan kecepatan lepas di permukaan planet, dan v_{enc} merupakan kecepatan rata-rata dari asteroid tipe Q-kompleks dan S-kompleks saat berpapasan dekat dengan masing-masing planet terestrial selama waktu integrasi (data diperoleh dari *file* *encuent.sal*). v_{esc} dapat dihitung menggunakan persamaan 3.25 (Stuart, 2003).

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM_p}{R_p}} \quad (3.25)$$

G merupakan konstanta universal gravitasi sebesar $6,67 \times 10^{-11} m^3/kg s^2$, dan M_p adalah massa planet. Pada penelitian ini, akan menggunakan ADB tipe Q kompleks dan S-kompleks yang memiliki diameter di atas 1 km, maka nilai H (magnitudo absolut asteroid) yang digunakan kurang dari 18 (Harvard, n.d.). $N(< H)$ dihitung berdasarkan model populasi ADB yang dilakukan oleh Bottke

dkk (2002). Jumlah kumulatif ADB dengan $N(< 18)$ untuk seluruh seluruh spektrum sebanyak 960 ± 120 asteroid. Berdasarkan hasil penelitian Carry dkk (2016), populasi ADB dengan spektrum tipe Q sebanyak 8%, sehingga populasi ADB tipe Q-kompleks sebanyak 77 ± 10 asteroid. Dari hasil pekerjaan Binzel dkk (2004) diperoleh bahwa rasio populasi ADB tipe Q terhadap tipe S (Q/S) sekitar 0,5 hingga 2. Untuk memperoleh populasi ADB tipe S -kompleks, digunakan nilai tengah dari kisaran rasio Q/S, sehingga diperoleh

$$Q/S = \frac{0,5 + 2}{2} = 1,25$$

Jadi, populasi ADB tipe S-kompleks sebanyak

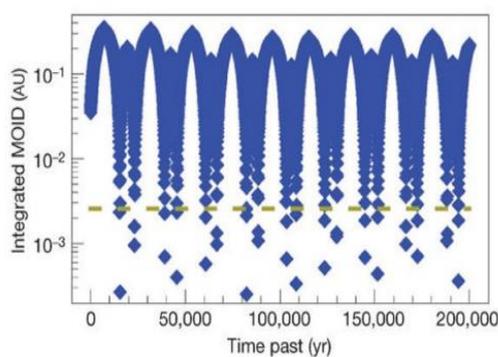
$$\frac{77 \pm 10}{1,25} = 62 \pm 8 \text{ asteroid}$$

Dengan demikian, nilai $N(< 18)_{Qkompleks} = 77 \text{ asteroid}$ dan $N(< 18)_{Skompleks} = 62$.

Selang waktu antarkejadian papasan dekat diperoleh dari $1/f_{kedekatan}$. Semakin kecil $1/f_{kedekatan}$ maka semakin sering terjadi papasan dekat antara asteroid dengan planet. Begitupun dengan selang waktu antarkejadian tumbukan dapat diperoleh dari $1/f_{tumbukan}$. Semakin kecil $1/f_{tumbukan}$ maka semakin sering asteroid mengalami tumbukan dengan planet.

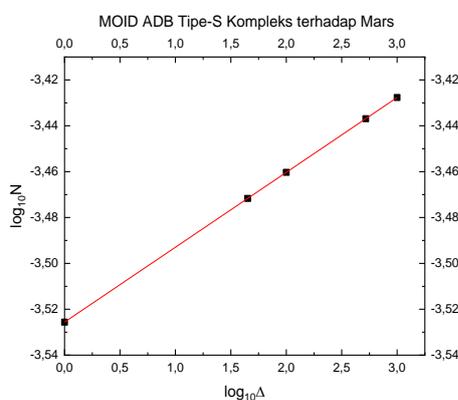
3.5.3 Pengolahan Data MOID ADB Tipe Q-kompleks dan S-kompleks

Data MOID diperoleh dengan menggunakan *software* IDL yang menggunakan prosedur numerik dan iteratif dari Wiśniowski dan Rickman (2013). Setelah itu dibuat rajah MOID dalam satuan AU terhadap waktu integrasi dalam satuan ribu tahun seperti hasil pekerjaan Binzel dkk. (2010), dimana integrasi dilakukan selama 200 ribu tahun ke belakang, hasil disajikan pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Grafik MOID terhadap waktu hasil pekerjaan Binzel dkk. (2010)

Selain validasi akan dibuat grafik distribusi jarak minimum ADB tipe Q-kompleks dan S-kompleks dengan planet terestrial berdasarkan data MOID, seperti Gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Grafik distribusi jarak minimum ADB dengan planet berdasarkan data MOID

Data MOID tidak hanya digunakan untuk validasi dan distribusi jarak minimum namun digunakan juga untuk mengetahui frekuensi kedekatan dan frekuensi tumbukan dengan pendekatan MOID, dengan menggunakan persamaan yang sama seperti pengolahan data pada pendekatan jarak papasan yaitu persamaan 3.23 hingga 3.25, dengan M merupakan jumlah peristiwa MOID dari seluruh sampel asteroid (masing-masing dari ADB tipe Q-kompleks dan S-kompleks) yang jaraknya kurang dari r . Nilai N , $N(< 18)$, v_{esc} , dan v_{enc} yang digunakan dalam pendekatan MOID sama dengan yang digunakan pada pendekatan jarak papasan.