

Menggunakan Teori Kompleksitas Algoritma Untuk Mengukur Kompleksitas Laplace's Demon

Muhammad Ravid Valiand -13518099
Program Studi Teknik Informatika
Sekolah Teknik Elektro dan Informatika
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia
13518099@std.stei.itb.ac.id

Abstract—Laplace's Demon adalah artikulasi pertama filsafat determinisme, dimana semua hal yang terjadi di dunia selalu akan terjadi karena masa depan kita tidak bisa dirubah. Laplace's Demon dibuat oleh Pierre-Simon de Laplace, yang membayangkan jika ada sebuah makhluk berakal yang mengetahui lokasi dan momentum semua atom di dunia pada satu saat, dan jika makhluk ini juga bisa menganalisis semua data ini, maka makhluk ini bisa melihat seluruh masa depan dan masa lampau dengan mengkalkulasinya dari data. Makalah ini akan mencoba untuk mengkalkulasi kompleksitas sebuah algoritma seperti Laplace's Demon.

Keywords— *Laplace's demon*, algoritma, kompleksitas, determinisme, alam semesta, atom.

I. PENDAHULUAN

Pada tahun 1814 sebuah pemikir Prancis bernama Pierre-Simon de Laplace menerbitkan sebuah buku bernama *A Philosophical Essay on Probabilities*, sebuah buku yang mengajarkan konsep dan penggunaan dari teori probabilitas. Buku ini juga mendemonstrasikan penggunaan probabilitas tanpa menggunakan matematika kompleks, tapi dari aplikasinya dalam hal seperti permainan, astronomi, dan asuransi [1].

Dalam buku ini, Laplace juga memberikan sebuah konsep yang akan nanti disebut sebagai Laplace's demon: sebuah makhluk yang mengetahui lokasi dan momentum semua atom di semesta pada satu saat saja dan, dengan menggunakan pengetahuan fisika dan analisis data, bisa mengkalkulasi lokasi dan momentum atom-atom itu di masa depan dan di masa lampau untuk memprediksi masa depan dan melihat semua masa lampau [1].

Ini adalah salah satu artikulasi pertama dari filsafat determinisme, dimana semua hal yang terjadi di semesta kita sudah direncanakan dari awal waktu dan tidak ada yang bisa dilakukan untuk merubah masa depan.

Sebuah makhluk atau algoritma yang bisa mengkalkulasi seluruh semesta pasti sangat kompleks, lebih kompleks dari algoritma apapun yang bisa dibuat di dunia. Pada makalah ini, kita akan mengkalkulasi kompleksitas algoritma sebuah program hipotetis yang bisa melakukan kalkulasi Laplace's demon.



Gambar 1: Pierre-Simon, marquis de Laplace.

Sumber: <https://www.britannica.com/biography/Pierre-Simon-marquis-de-Laplace>

Diakses 2 Desember 2019

II. LANDASAN TEORI

A. Algoritma Laplace

Untuk kemudahan argumentasi, program hipotetis kita akan disebut sebagai Algoritma Laplace hanya di bab ini.

Algoritma Laplace akan melakukan kalkulasi yang seharusnya dilakukan oleh makhluk Laplace's demon, yaitu mengambil data lokasi dan momentum semua atom yang ada di alam semesta, lalu menggunakan data itu dan pengetahuan alami untuk mengkalkulasi seluruh masa depan dan masa lampau alam semesta.

Karena makalah ini berfokus pada kompleksitas algoritma Algoritma Laplace, kita akan mengabaikan bagaimana kita mendapatkan data lokasi dan pergerakan semua atom di

semesta. Sama dengan hal itu, kita juga akan mengasumsi bahwa Algoritma Laplace sudah dibuat dengan pengetahuan aturan alam semesta dalam bentuk matematika dan fisika yang akurat, sehingga output algoritma sudah tentu akurat.

B. Kompleksitas Algoritma

Sebuah masalah bisa memiliki banyak algoritma penyelesaiannya, jadi algoritma yang paling bagus bukan hanya yang benar, tapi algoritma yang paling efisien. Dan algoritma yang paling efisien adalah algoritma yang menggunakan waktu dan memori paling minimal.

Kebutuhan waktu dan memori sebuah algoritma bergantung pada masukan yang diberi oleh user (n) yang menyatakan banyaknya data yang perlu diproses.

Secara praktik, kita tidak bisa mengetahui banyak waktu atau memori yang digunakan oleh sebuah algoritma, karena setiap komputer dan compiler yang digunakan untuk algoritma bisa memberi waktu eksekusi yang berbeda. Karena itu kita akan menggunakan nilai sebuah abstrak untuk merepresentasikan efisiensi algoritma, yang dinamakan sebagai kompleksitas algoritma. Ada dua jenis kompleksitas yang bisa diukur: kompleksitas waktu dan kompleksitas ruang.

Pada makalah ini, kita hanya akan mendiskusikan kompleksitas waktu.

Kompleksitas waktu, $T(n)$, itu diukur dari jumlah tahapan proses yang butuh dilakukan algoritma untuk sebuah masukan sebesar n . Tahapan tahapan yang dilakukan bisa dalam berbagai bentuk, dari input atau output data, ke aritmatika, ke pemanggilan fungsi atau prosedur. Untuk kepraktekan, kita hanya menghitung tahapan yang penting atau khas untuk algoritma.

Kompleksitas waktu dibagi menjadi 3 macam

1. $T_{max}(n)$: Kompleksitas waktu maksimum.
2. $T_{min}(n)$: Kompleksitas waktu minimum.
3. $T_{avg}(n)$: Kompleksitas waktu rata-rata.

Untuk merepresentasikan kompleksitas waktu, kita akan menggunakan notasi O-Besar, atau kompleksitas waktu asimptotik. Notasi O-Besar direpresentasikan sebagai $O(n)$, dimana $T(n) = O(f(n))$, jika ada konstanta C dan n_0 sedemikian

$$T(n) \leq C(f(n)) \quad (1)$$

Untuk $n \geq n_0$.

Misalnya, jika

$$T(n) = a_m n^m + a_{m-1} n^{m-1} + a_{m-2} n^{m-2} + \dots + a_1 n^1 + a_0$$

Maka $T(n) = O(n^m)$. Atau cukup melihat suku dengan pangkat yang paling besar.

Untuk suku-suku yang lain, ada beberapa peraturan

1. Eksponensial lebih besar dari pangkat sembarang
2. Perpangkatan lebih besar dari $\ln n$.
3. Semua logaritma bertumbuh pada laju yang sama.
4. $\log_n n$ lebih besar dari n tapi lebih kecil dari n^2

Pengelompokan Algoritma Berdasarkan Notasi O-Besar

Kelompok Algoritma	Nama
$O(1)$	Konstan
$O(\log n)$	Logaritmik
$O(n)$	Lanjar
$O(\log_n n)$	$N \log n$
$O(n^2)$	Kuadratik
$O(n^3)$	Kubik
$O(2^n)$	Eksponensial
$O(n!)$	Faktorial

Fig. 1

Selain notasi O-Besar, ada juga notasi Ω -Besar dan notasi Θ -Besar.

Notasi Ω -Besar direpresentasikan sebagai $\Omega(g(n))$, dimana $T(n) = \Omega(g(n))$, jika ada konstanta C dan n_0 sedemikian

$$T(n) \geq C(g(n)) \quad (2)$$

Untuk $n \geq n_0$.

Notasi Θ -Besar direpresentasikan sebagai $\Theta(h(n))$, dimana $T(n) = \Theta(h(n))$, jika ada konstanta C dan n_0 sedemikian

$$T(n) = O(h(n))$$

dan

$$T(n) = \Omega(h(n))$$

III. PEMBAHASAN

A. Algoritma Laplace

Algoritma Laplace, seperti Laplace's Demon, akan dibuat untuk mengambil data lokasi dan pergerakan semua atom di alam semesta pada satu saat dan lalu mengeluarkan data lokasi dan pergerakan atom-atom itu di semua saat di masa depan dan di masa lampau.

Dengan pengetahuan ini diketahui bahwa algoritma hipotetis ini akan melakukan kalkulasi lokasi dan pergerakan untuk semua atom-atom input dan untuk semua saat yang ada di masa depan dan di masa lampau.

Sebagai contoh, inilah contoh Algoritma Laplace ditulis dalam Notasi Algoritmik:

Program AlgoritmaLaplace

{Program Akan Menjalankan Algoritma Laplace dan Mengkalkulasi Lokasi dan Momentum Semua Atom Pada Semua Saat}

Gambar 2.1: Header Algoritma Hipotetis.

KAMUS

constant N: **integer** = {Total Jumlah Atom Di Alam Semesta}

constant T: **integer** = {Total Waktu Di Alam Semesta}

type Point

< X: **integer**,

Y: **integer**,

Z: **integer**>

type Atom:

< Lokasi: Point,

Momentum: **double**,

Waktu: **integer**>

function AtomSaatX (A : Atom, X : **integer**) -> Atom

{Mengambil input Atom dan mengembalikan data Atom itu pada waktu X. X adalah dalam detik setelah Big Bang}

AtomArray: **array** of [1..N] of Atom

i, j: **integer**

Gambar 2.2: Kamus Lokal Algoritma Hipotetis

ALGORITMA

i <- 1

j <- 1

input(N)

input(T)

input(AtomArray)

traversal [1 .. N]

 j **traversal** [1 .. T]

 AtomSaatX(AtomArray[N], T)

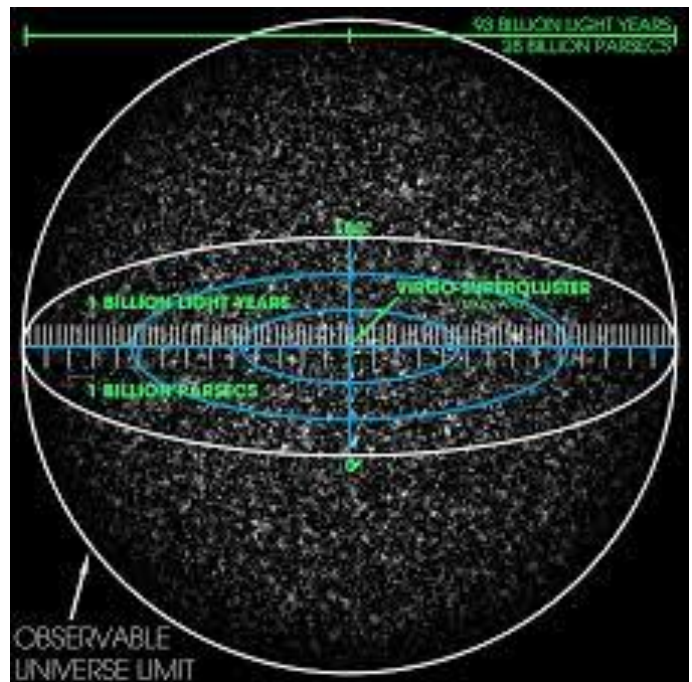
Gambar 2.3: Algoritma Hipotetis

Bisa dilihat bahwa tahapan khas dalam program hipotetis ini adalah penggunaan AtomSaatX, sebuah fungsi yang mengkalkulasi posisi dan pergerakan sebuah Atom pada sebuah saat di masa depan atau di masa lampau.

AtomSaatX akan dipanggil sekali untuk semua atom di alam semesta (N) pada semua saat yang pernah ada dan yang akan ada di alam semesta (T), atau $N \cdot T$ kali. Inilah besar input yang akan digunakan oleh algoritma kita.

B. Jumlah Atom Di Alam Semesta (N)

Karena massa dan energy tidak bisa dibuat atau dihancurkan, jumlah atom di alam semesta adalah konstan, dengan semua atom yang berada di akhir alam semesta berada juga di awalnya, dengan pergerakan dan lokasi yang berbeda [3]. Karena ini, nilai Jumlah Atom Di Alam Semesta (N) tidak akan berubah dari waktu ke waktu.



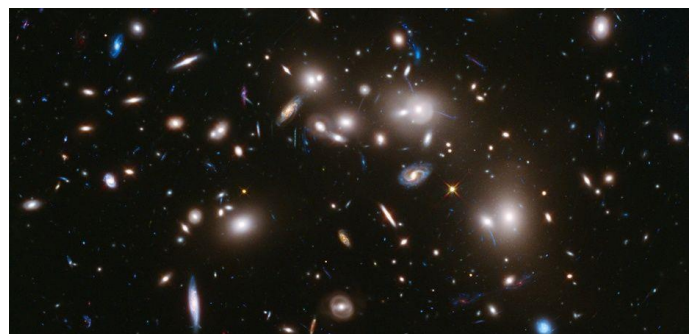
Gambar 3: Alam Semesta Teramati

Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Observable_universe

Diakses 4 Desember 2019

Masalah dalam menghitung semua atom di alam semesta adalah kemungkinan alam semesta dan atom-atom didalamnya tak terhingga. Jika ini betul, maka Kompleksitas Algoritma Laplace selalu menjadi tak terhingga juga dan tidak bisa dikalkulasi. Jika ini tidak benar dan alam semesta memang mempunyai batas, maka jumlah atom di alam semesta juga terbatas, dan kompleksitas algoritma Laplace bisa dikalkulasi.

Di makalah ini, kita akan mengasumsi bahwa jumlah atom di alam semesta memang terbatas, dan bisa dihitung dengan matematika. Karena ini, kita akan mengasumsi bahwa batas alam semesta teramati adalah batas untuk seluruh alam semesta yang ada.



Gambar 4

Sumber: Hubble Space Telescope

Sebuah penelitian yang dilakukan menyatakan bahwa jumlah bintang di alam semesta teramati adalah sekitar 6×10^{22} bintang [4]. Kebanyakan bintang di alam semesta memiliki massa yang dekat dengan matahari kita, yaitu sekitar 2×10^{30}

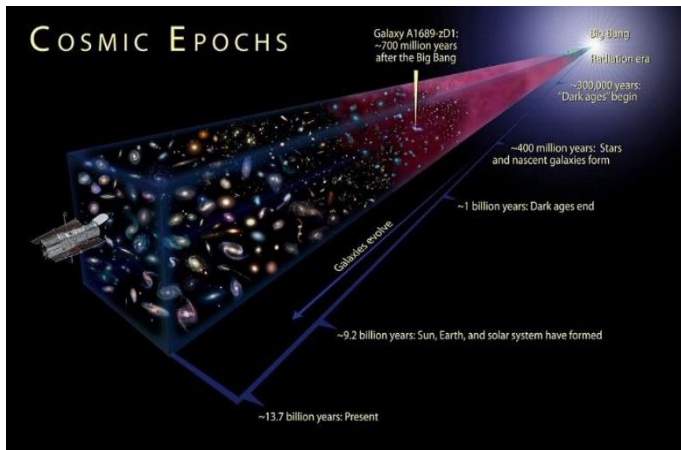
kilogram [5]. Kebanyakan berat ini adalah dalam atom Hidrogen, dengan matahari kita memiliki 10^{57} atom hidrogen. Dengan mengkalikan jumlah atom per bintang (10^{57}) dengan jumlah bintang yang ada di alam semesta (6×10^{22}), kita mendapatkan sebanyak

$$N = 10^{57} \times 6 \times 10^{22}$$

$$N = 6 \times 10^{79}$$

atom di alam semesta teramati.

C. Umur Dan Lama Hidup Alam Semesta



Gambar 5: Melihat Alam Semesta Setelah Big Bang
Sumber: NASA, ESA, and A. Feild (STScI)/ESA, Planck Collaboration

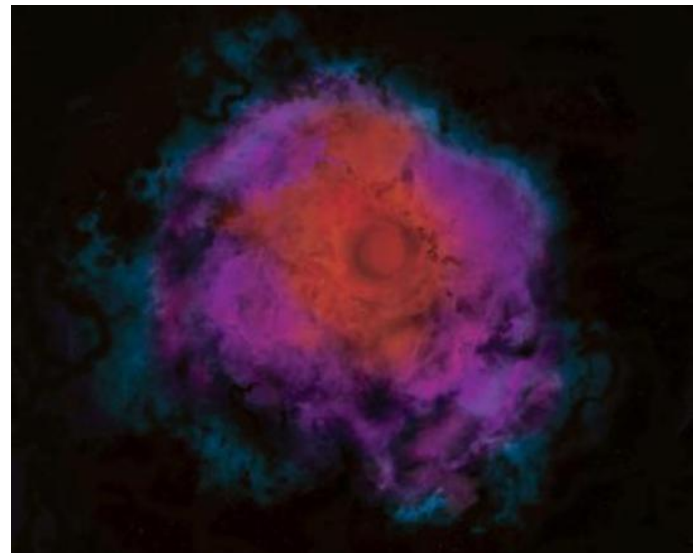
Penhitungan total waktu di alam semesta lebih kompleks dari pada menghitung total jumlah atom. Ini karena, walaupun kita mempunyai teori yang kuat untuk bagaimana alam semesta terbuat, kita tidak tahu kapan dan bagaimana alam semesta akan berakhir.

Karena teori utama para peneliti adalah teori Big Bang, kita akan menggunakan teori ini sebagai basis untuk mengukur umurnya alam semesta [6]. Dengan ini, kita asumsikan bahwa alam semesta dibuat dalam peristiwa Big Bang, atau Ledakan Dasyat. Peneliti telah menentukan bahwa Ledakan Dasyat ini terjadi sekitar 13.8 miliar (1.38×10^{10}) tahun yang lalu, memberikan kita referensi untuk umur alam semesta [7].

Perhitungan waktu dari sekarang sampai akhir alam semesta itu lebih susah, karena kita tidak akan tahu bagaimana alam semesta ini akan berakhir. Karena itu kita akan menggunakan satu teori yang lain, yaitu teori Big Freeze.

Teori Big Freeze adalah teori dimana entropi dan inflasi alam semesta akan meningkat ke maksimumnya dan akan menjauhkan semua benda angkasa dan gas-gas nebula yang ada di luar angkasa, sampai akhirnya tidak ada bintang baru yang bisa lahir dan seluruh alam semesta menjadi gelap dan dingin saat alam semesta memasuki era gelap alam semesta [8]. Era gelap ini diestimasikan akan terjadi dalam 10^{100} atau satu googol tahun di masa depan.

Waktu masih bisa berjalan di era gelap setelah big freeze, tapi karena tidak akan terjadi apa apa di era gelap itu, kita bisa mengabaikan waktu setelah era gelap.



Gambar 6: Ilustrasi Big Freeze

Sumber: <https://www.universetoday.com/36917/big-freeze/>
 Diakses 6 Desember 2019

Dengan ini kita mendapatkan total waktu yang bisa terjadi di alam semesta yang kita butuh kalkulasi dengan Algoritma Laplace, yaitu $(1.38 \times 10^{10}) + (10^{100})$ tahun. Karena nomor 1.38×10^{10} sangat sepele saat dibandingkan dengan satu googol, kita bisa abaikan waktu itu sebagai galat.

Total Waktu Di Alam Semesta (T) diukur dalam satuan detik, jadi jumlah yang telah kita dapatkan butuh dikonversikan ke satuan itu.

Setiap tahun bumi adalah 365.25 hari, setiap hari di bumi adalah 24 jam, setiap jam adalah 60 menit, dan setiap menit adalah 60 detik. Dengan ini, kita mengetahui bahwa pada setiap tahun bumi, ada sebanyak

$$365.25 \times 24 \times 60 \times 60 = 315,536,000$$

detik di alam semesta.

Jumlah itu bisa disederhanakan menjadi 3.16×10^8 detik. Maka, jumlah detik yang ada di alam semesta ini adalah

$$T = 10^{100} \times 1.38 \times 10^{10}$$

$$T = 3.16 \times 10^{108} s$$

D. Kompleksitas Algoritma

Dengan jumlah total atom yang ada di alam semesta (N) Kompleksitas Algoritma Laplace adalah $T(L)$:

$$T(L) = N \times T$$

Dimana N adalah jumlah atom yang ada didalam alam semesta, dan T sebagai jumlah waktu yang ada dalam umur dan panjang hidup alam semesta yang diukur dalam detik. Dengan menggunakan variable yang didapatkan di bagian-bagian sebelumnya, kita mendapatkan.

$$T(L) = 6 \times 10^{79} \times 3.16 \times 10^{108}$$

$$T(L) = 1.9 \times 10^{188}$$

Ini dapat diekspresikan dalam notasi O-Besar menjadi

$$O(L) = \max(1.9, 10^{188})$$

$$O(L) = 10^{188}$$

Dengan ini kita mengetahui bahwa Kompleksitas Algoritma Laplace yang hipotetis ini adalah sekitar 1.9×10^{188} , dan jumlah ini bisa di turunkan ke 10^{188} jika kita menggunakan notasi O-Besar.

E. Masalah Dengan Menjalankan Algoritma Laplace

Dari semua informasi yang telah didapatkan, kita bisa tahu bahwa membuat dan menjalankan Algoritma Laplace ini sangat tidak praktis, dan mungkin saja tidak mungkin dilakukan, untuk beberapa alasan.

Pertama adalah data. Walaupun kita mengabaikan cara kita mendapatkan informasi akurat tentang fisika alam semesta ini dan juga lokasi dan momentum semua atom yang ada di alam semesta, kita masih akan bermasalah dengan menyimpan semua data itu. Database yang dibutuhkan algoritma ini harus cukup untuk menyimpan data semua atom yang ada di alam semesta, lokasi mereka, dan juga perpindahan semua atom itu pada waktu yang sama.

Dari kalkulasi sebelumnya kita mengetahui bahwa ada sekitar 6×10^{79} atom di alam semesta teramati. Jika diasumsi data satu atom bisa disimpan dalam satu byte saja, database yang perlu digunakan butuh menyimpan 6×10^{79} byte data, atau sebanyak 6×10^{55} yottabyte data (satu yottabyte sama dengan satu triliun terrabyte).

Sebagai perbandingan, beberapa estimasi memberikan nomor sebesar 2.7 zettabyte sebagai jumlah data yang ada dalam internet diseluruh dunia. Satu yottabyte data itu lebih dari 1000 zettabyte data, jadi informasi yang digunakan oleh Algoritma Laplace itu lebih dari 6×10^{58} zettabyte. Ini berarti database yang diperlukan oleh Algoritma Laplace itu lebih dari 2.2×10^{57} kali data yang ada di internet sekarang.

Kedua adalah masalah *runtime* Algoritma Laplace ini. Dengan kompleksitas sebesar 1.9×10^{188} , Algoritma Laplace yang hipotetis ini mungkin saja Algoritma Hipotetis yang paling kompleks di alam semesta. Jika kita mengasumsikan setiap tahap dari algoritma ini bisa dijalankan dalam satu attosecond (1×10^{-18} s), yaitu jumlah waktu terkecil yang dapat diukur oleh manusia, program ini masih akan memerlukan lebih dari satu googol tahun untuk selesai melakukan prosesnya. Untuk perhitungan yang spesifik, algoritma ini membutuhkan 2×10^{51} googol tahun untuk selesai diproses, atau 2×10^{51} kali waktu yang ada dalam panjang hidupnya alam semesta.

Selain itu, mungkin juga ada sebuah batas pada kekuatan komputasi sebuah alam semesta yang didapatkan lewat kalkulasi yang menggunakan entropi maksimum alam semesta, kecepatan cahaya, dan waktu minimum yang dibutuhkan untuk membawa informasi lewat jarak sekecil satu Plank, yang ternyata adalah 1×10^{120} bits [10]. Program apapun yang membutuhkan data lebih banyak dari 1×10^{120} bit tidak bisa dijalankan dalam semua waktu yang ada di alam semesta.

Masalah- masalah ini menginformasikan kita bahwa pembuatan dan penjalanan sebuah algoritma yang berfungsi seperti Laplace's demon tidak mungkin menurut peraturan fisika dan waktu yang ada dalam pengetahuan kita sekarang. Mungkin saja di masa depan kita bisa mendapatkan cukup pengetahuan untuk melewati semua masalah ini dan membuat sebuah mesin yang bisa melihat ke masa depan dan masa lampau sebuah alam semesta, tapi pastilah hari itu jauh dari sekarang.

IV. KESIMPULAN

Dari Makalah ini, kita bisa mengambil beberapa kesimpulan:

- 1) Laplace's demon adalah sebuah konsep makhluk yang, jika iya mengetahui lokasi dan momentum semua atom di alam semesta pada satu saat, bisa mengkalkulasi lokasi dan momentum atom-atom itu di saat apapun di masa depan dan di masa lampau.
- 2) Massa total alam semesta teramati bisa dikalkulasi lewat massa bintang dan estimasi jumlah bintang di alam semesta. Data ini bisa digunakan untuk menentukan sebuah estimasi total atom didalam alam semesta, yaitu 6×10^{79} .
- 3) Total waktu yang ada di alam semesta, dari awalnya di Big Bang, sampai akhirnya di Big Freeze, adalah sekitar satu googol (10^{100}) tahun.
- 4) Kompleksitas sebuah algoritma yang bisa melakukan kalkulasi yang dilakukan oleh Laplace's demon adalah 1.9×10^{188} , atau hanya 10^{188} jika menggunakan notasi O-Besar.
- 5) Banyaknya data yang diperlukan Laplace's demon untuk menjalankan kalkulasinya adalah sebanyak 6×10^{55} yottabyte.
- 6) Karena kompleksitas Laplace's demon sangat besar, dan karena kekuatan komputasional yang bisa ada dalam alam semesta terbatas, algoritma yang melakukan kalkulasi ini tidak mungkin selesai prosesnya dalam semua waktu yang ada di panjang hidup alam semesta.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ingin mengucapkan terimakasih kepada Tuhan Yang Maha Esa, untuk membuat proses pembuatan makalah ini lancar sampai penyelesaiannya. Saya juga ingin memberi terimakasih ke orang tua ku, untuk memasukkan saya ke kuliah seperti ITB dan untuk dukungan mereka dalam meraih mimpi saya. Saya juga ingin memberi terimakasih ke Dr. Ir. Rinaldi Munir, MT untuk membuat presentasi Kompleksitas Algoritma yang sangat membantui dalam pembuatan makalah ini.

Akhirnya, saya ingin memberi terima kasih ke dosen Matematika Diskrit saya, Fariska Zakhrativa Ruskanda, S.T., M.T., untuk mengajari saya walaupun saya susah berkonsentrasi di kelas, dan kepada teman-teman sekelas saya untuk membantu saya dalam mendapatkan ide makalah dan untuk menyemangati saya dalam mengerjakan makalah ini.

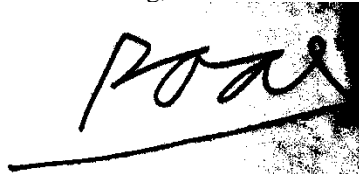
REFERENCES

- [1] Laplace, Pierre Simon, *A Philosophical Essay on Probabilities*, translated into English from the original French 6th ed. by Truscott, F.W. and Emory, F.L., Dover Publications (New York, 1951) p.4
- [2] Rinaldi Mudir, *Kompleksitas Algoritma*, Bahan Kuliah IF2120 Matematika Diskrit
- [3] Fr. 12; see pp.291–2 of Kirk, G. S.; J. E. Raven; Malcolm Schofield (1983). *The Presocratic Philosophers (2 ed.)*. Cambridge: [Cambridge University Press](#). ISBN 978-0-521-27455-5.
- [4] Gott III, J.Richard, et al. "[A Map of the Universe](#)." The Astrophysical Journal, vol. 624, no. 2, IOP Publishing, May 2005, pp. 463–84.
- [5] <https://www.thoughtco.com/number-of-atoms-in-the-universe-603795>, Diakses 4 Desember 2019
- [6] <https://www.space.com/25126-big-bang-theory.html>, Diakses 4 Desember 2019
- [7] <https://www.space.com/24054-how-old-is-the-universe.html>, Diakses 4 Desember 2019
- [8] *The Five Ages of the Universe*, Fred Adams and Greg Laughlin, New York: The Free Press, 1999, ISBN 0-684-85422-8.
- [9] <https://www.nodegraph.se/big-data-facts/>, Diakses 6 Desember 2019.
- [10] *Physical Review Focus (24 May 2002)*. "[If the Universe Were a Computer](#)". *Physics*. APS.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 3 Desember 2017



Muhammad Ravid Valiandi - 13518099