

**LAPORAN PENELITIAN PENGEMBANGAN BIDANG
STUDI/ILMU/KEAHLIAN
TAHUN ANGGARAN 2013**



**PEMODELAN LALU LINTAS KENDARAAN PADA JALAN SEARAH
MENGUNAKAN *TOTALLY ASYMMETRIC EXCLUSION PROCESS*
SEBAGAI UPAYA UNTUK MENGURANGI KEPADATAN LALU LINTAS**

Oleh:

Bambang Ruwanto, M.Si NIP. 19651225 199101 1 001 (Ketua)

Wipar Sunu Brams Dwandaru, S.Si, M.Sc, Ph.D NIP. 19800129 200501 1 003 (Anggota)

Denny Darmawan, M.Sc NIP. 19791202 200312 1 002 (Anggota)

darmawan@uny.ac.id

**JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2013**

**LAPORAN PENELITIAN PENGEMBANGAN BIDANG
STUDI/ILMU/KEAHLIAN
TAHUN ANGGARAN 2013**



**PEMODELAN LALU LINTAS KENDARAAN PADA JALAN SEARAH
MENGUNAKAN *TOTALLY ASYMMETRIC EXCLUSION PROCESS*
SEBAGAI UPAYA UNTUK MENGURANGI KEPADATAN LALU LINTAS**

Oleh:

Bambang Ruwanto, M.Si NIP. 19651225 199101 1 001 (Ketua)

Wipsar Sunu Brams Dwandaru, S.Si, M.Sc, Ph.D NIP. 19800129 200501 1 003 (Anggota)

Denny Darmawan, M.Sc NIP. 19791202 200312 1 002 (Anggota)

**JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2013**

**LEMBAR EVALUASI
LAPORAN PENELITIAN**

1. Judul Penelitian

Pemodelan Lalu Lintas Kendaraan pada Jalan Searah Menggunakan *Totally Asymmetric Exclusion Process* Sebagai Upaya untuk Mengurangi Kepadatan Lalu Lintas

2. Hasil Evaluasi

- a. Pelaksanaan kegiatan Penelitian/PPM telah sesuai dengan rancangan yang tercantum dalam proposal.
- b. Sistematika laporan **sudah** sesuai dengan pedoman penyusunan laporan penelitian.
- c. Hal-hal lain **sudah** memenuhi persyaratan

3. Simpulan

Laporan **dapat** diterima.

Yogyakarta, 31 Desember 2013,

Mengetahui,

Wakil Dekan I

Ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY

Dr. Suyanta
NIP. 19660508 199203 1 002

Drs. Suparno, M.App.Sc., Ph.D
NIP. 19600814 198803 1 003

LEMBAR PENGESAHAN
LAPORAN PENELITIAN BIDANG STUDI/ILMU/KEAHLIAN

1. Judul Penelitian : Pemodelan Lalu Lintas Kendaraan pada Jalan Searah Menggunakan *Totally Asymmetric Exclusion Process* sebagai Upaya untuk Mengurangi Kepadatan Lalu Lintas
2. Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap dan Gelar : Bambang Ruwanto
- b. Jenis Kelamin : Laki-Laki
- c. Pangkat/Gol./NIP : Penata Tingkat I/III.d/19651225 199101 1 001
- d. Jabatan Fungsional : Lektor (300)
- e. Fakultas/Jurusan : MIPA/Pendidikan Fisika
- f. Universitas : Universitas Negeri Yogyakarta
- g. Alamat : Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA, UNY, Karangmalang, Yogyakarta, 55281
- h. Nomor HP : 08122720534
- i. Email : ruwantobambang@yahoo.co.id
3. Tema Payung Penelitian : Pemodelan Lalu Lintas Kendaraan pada Jalan Searah Menggunakan Model *Totally Asymmetric Exclusion Process*
4. Skim Penelitian : pengembangan ilmu
5. Bidang Keilmuan : Fisika Matematik, Teori, dan Komputasi
6. Tim Peneliti :
- | No. | Nama/Gelar | Bidang Keahlian |
|-----|---------------------------------------|----------------------------|
| 1. | Bambang Ruwanto | Fisika Matematika |
| 2. | Wipar Sunu Brams Dwandaru, M.Sc, Ph.D | Fisika Teori dan Komputasi |
| 3. | Denny Darmawan, M.Sc | Fisika Komputasi |
7. Mahasiswa yang Terlibat
- | No. | Nama | NIM |
|-----|------------------------|-------------|
| 1. | Robby Arbanis Adipurno | 09306141037 |
| 2. | Chandra Adhitya | 09306141024 |
| 3. | Nurlita Utami | 06306144029 |
8. Waktu/Lama Penelitian : 6 (enam) bulan
9. Lokasi Penelitian : Laboratorium Fisika Teori dan Komputasi, Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA, UNY
10. Biaya yang diperlukan : Rp. 10.000.000,00 (sepuluh juta)

Yogyakarta, 30 Desember 2013

Mengetahui,
Dekan FMIPA UNY,

Ketua Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY

(**Dr. Hartono**)
NIP. 19620329 198702 1 002

(**Drs. Suparno, M.App.Sc., Ph.D**)
NIP. 19600814 198803 1 003

**PEMODELAN LALU LINTAS KENDARAAN PADA JALAN SEARAH
MENGUNAKAN *TOTALLY ASYMMETRIC EXCLUSION PROCESS* SEBAGAI
UPAYA UNTUK MENGURANGI KEPADATAN LALU LINTAS**

Oleh:

Bambang Ruwanto, Wipar Sunu Brams Dwandaru, dan Denny Darmawan

Jurusan Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, UNY
Karangmalang, 55281, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini menawarkan analisis teoritik dan perluasan sebuah model matematis dalam Fisika yang dapat menggambarkan dinamika lalu lintas kendaraan pada jalan searah sebagai upaya untuk mencari solusi terhadap permasalahan kepadatan dan kemacetan lalu lintas. Model matematis ini dikenal sebagai *totally asymmetric exclusion process* atau TASEP. Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah (i) memodelkan lalu lintas kendaraan pada jalan searah menggunakan TASEP dengan syarat batas terbuka, dan aturan dinamika *sequential* serta *parallel updatings*, (ii) menentukan dan mengkaji kerapatan dan rapat arus partikel yang diperoleh dari model TASEP, baik menggunakan analisis teoretik maupun numerik, dan (iii) menginterpretasi hasil dari tujuan (ii) untuk kepadatan dan arus lalu lintas kendaraan pada jalan searah.

TASEP merupakan sebuah model non-equilibrium dimana partikel dengan interaksi inti keras dapat melompat ke kiri atau ke kanan (tidak boleh keduanya) dalam suatu kekisi (jalur). TASEP dispesifikasi oleh adanya aturan dinamika dan syarat batas. Dari 'lalu lintas' partikel-partikel ini, dapat diperoleh nilai rerata posisi partikel dalam menempati suatu kekisi atau kerapatan, dan juga rapat arus partikel. Penelitian ini dilaksanakan sebagai berikut. Pertama, dilakukan pemodelan terhadap lalu lintas di jalan searah sesuai dengan model TASEP. Dalam hal ini, kendaraan dianalogikan sebagai partikel-partikel dengan interaksi inti keras, sedangkan jalan searah dianalogikan dengan sistem kekisi yang diskrit. Selanjutnya, dilakukan analisis numerik menggunakan program komputer untuk memperoleh kerapatan dan rapat arus dari model TASEP dengan aturan dinamika *sequential* dan *parallel updatings* dan syarat batas terbuka. Dari berbagai profil kerapatan ini dapat diperoleh diagram fase. Dari berbagai profil kerapatan, rapat arus, dan diagram fase, maka dapat dilakukan interpretasi model TASEP untuk lalu lintas kendaraan di jalan searah.

Dari analisis numerik dan teoretik yang telah dilakukan, diperoleh empat profil kerapatan untuk model TASEP dengan aturan dinamika *sequential* dan paralel *updatings*, yakni kerapatan rendah (LD), kerapatan tinggi (HD), fase koeksistensi (CP), dan arus maksimal (MC). Profil kerapatan untuk kedua aturan dinamika di atas tidak berbeda, kecuali untuk fase MC. Profil rapat arus untuk model TASEP dengan kedua aturan dinamika di atas bernilai konstan. Untuk aturan dinamika *sequential updatings*, nilai maksimal rapat arusnya adalah

0.25, yakni saat fasenya MC. Sedangkan untuk aturan dinamika paralel *updating*, nilai rapat pada fase MC bergantian tinggi dan rendah sepanjang kekisi. Diagram fase yang sama diperoleh untuk kedua aturan dinamika di atas. Dari berbagai kerapatan dan rapat arus yang diperoleh untuk model TASEP ini, dapat dilakukan interpretasi untuk lalu lintas di jalan searah. Untuk laju masuk kendaraan yang lebih kecil daripada laju keluar kendaraan, dan laju masuk tidak melebihi 0.5, maka lalu lintas kendaraan akan berada pada kerapatan rendah. Untuk laju masuk kendaraan yang lebih besar daripada laju keluarnya, dan laju keluarnya tidak melebihi 0.5, maka lalu lintas kendaraan akan berada pada kepadatan tinggi (rawan kemacetan). Sedangkan, jika laju masuk dan keluar kendaraan di atas 0.5, maka lalu lintas kendaraan akan berada pada fase arus maksimal. Pada keadaan ini, lalu lintas kendaraan padat tetapi lancar.

Katakunci: TASEP, jalan searah, aturan dinamika, syarat batas

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Di Indonesia, alat transportasi tidak dapat dipungkiri lagi merupakan salah satu kebutuhan esensial. Dengan bertambahnya jumlah penduduk, cenderung bertambah pula kendaraan roda empat dan roda dua. Di Yogyakarta sendiri, semakin maraknya kendaraan baru berplat 'putih' menunjukkan semakin bertambahnya jumlah kendaraan di jalan. Sebagai negara yang sedang berkembang, fenomena ini tentu cukup baik dari konteks ekonomi. Hal ini menunjukkan bahwa masyarakat masih memiliki daya beli walau iklim ekonomi dunia masih tidak menentu.



Gambar 1. Kendaraan roda empat dan dua memadati jalan Yogyakarta – Purworejo [1].

Namun demikian, tentu saja berbagai dampak negatif dapat pula muncul dengan maraknya kendaraan di ruas-ruas jalan, yakni polusi (udara dan bunyi) serta kemacetan lalu lintas. Berdasarkan pengalaman pribadi, ketika penulis masih duduk di bangku sekolah dasar (dua puluh lima tahun yang lalu), jalan Monumen Yogya Kembali (Monjali) sampai persimpangan Tugu Yogya, setiap pagi (waktu kerja) masih tampak lenggang. Selain itu, lebih banyak terlihat kendaraan roda dua (sepeda ataupun sepeda motor) dibandingkan kendaraan roda empat. Namun, sekarang ini, walau jalan tersebut telah diperbaiki dan diperluas, setiap paginya pasti padat kendaraan sehingga terjadi kemacetan. Kemacetan yang terjadi di jalanan dapat menyebabkan efek negatif lainnya, yakni makin bertambahnya konsumsi bahan bakar minyak

bumi dan makin lama waktu tunggu sampai tujuan. Oleh karena itu, penting untuk dapat mencari solusi terhadap permasalahan kemacetan lalu lintas yang terjadi saat ini.

Fisika merupakan usaha menyeluruh dari manusia untuk mempelajari perilaku fisis alam. Oleh sebab itu, ilmu fisika hendaknya dapat dimanfaatkan untuk mencari solusi atas permasalahan yang nyata di masyarakat, termasuk pula masalah kemacetan lalu lintas.

Penelitian ini menawarkan analisis teoritik dan perluasan sebuah model matematis dalam Fisika yang dapat menggambarkan dinamika lalu lintas kendaraan pada jalan searah sebagai upaya untuk mencari solusi terhadap permasalahan kepadatan dan kemacetan lalu lintas. Model matematis ini dikenal sebagai *totally simple asymmetric exclusion process* atau lebih dikenal sebagai TASEP. TASEP merupakan sebuah model non-equilibrium yang mana partikel dengan interaksi inti keras dapat melompat ke kiri atau ke kanan (tidak boleh keduanya) dalam suatu kekisi (jalur). TASEP dispesifikasi oleh adanya aturan dinamika dan syarat batas. Dari 'lalu lintas' partikel-partikel ini, dapat diperoleh nilai rerata posisi partikel dalam menempati suatu kekisi atau kerapatan, dan juga rapat arus partikel.

TASEP merupakan model yang baku untuk mempelajari sifat-sifat fisis dari sistem transpor dalam ilmu Biologi dan Fisika. TASEP dapat digunakan untuk mempelajari dinamika ribosom dalam proses protein sintesis [2, 3, 4, 5]. Model ini juga dapat menggambarkan gerak motor protein sepanjang *microtubule*. Dalam bidang fisika zat padat lunak (*soft condensed matter physics*) TASEP dapat digunakan untuk mempelajari dinamika gerak koloid dalam suatu media berpori. Model ini juga dapat digunakan untuk mempelajari kelayakan jaringan nirkabel [6].

Keunggulan model ini dibandingkan dengan model dinamika lainnya adalah kesederhanaan aturan dinamikanya. Aturan dinamika ini akan menentukan detail gerak partikel di dalam sistem kekisi. Dari aturan dinamika inilah, model TASEP dapat disimulasikan ataupun dapat dianalisis secara numerik untuk mendapatkan kerapatan dan rapat arusnya.

Syarat batas merupakan kondisi tertentu yang ditetapkan pada ujung-ujung sistem kekisi. Ada dua syarat batas yang biasanya digunakan dalam model TASEP, yaitu syarat batas tertutup

(periodik) dan terbuka. Syarat batas yang disebutkan terlebih dahulu dapat direalisasikan dengan menyatukan kekisi yang pertama dan kekisi yang terakhir dalam sistem kekisi sedemikian sehingga diperoleh suatu topologi berbentuk ‘cincin’. Sedangkan, syarat batas terbuka mensyaratkan adanya laju masukan dan laju keluaran pada ujung-ujung kekisi. Dalam penelitian ini akan digunakan syarat batas terbuka. Syarat batas ini menarik untuk dipelajari karena dapat memunculkan berbagai sifat menarik pada TASEP, sebagai contohnya adanya transisi fase [7, 8, 9, 10].

Dalam penelitian ini, analisis numerik dan simulasi akan digunakan dalam pemodelan lalu lintas kendaraan pada jalan searah menggunakan TASEP. Dua aturan dinamika akan diaplikasikan untuk menunjukkan gerak kendaraan, yaitu *sequential* dan *parallel updatings*. Dalam pemodelan ini, setiap **kendaraan** diandaikan sebagai **partikel**, sedangkan **jalan searah** diandaikan sebagai sebuah **sistem kekisi**. Dengan demikian, kendaraan yang bergerak pada jalan raya diandaikan sebagai partikel yang melompat pada sistem kekisi.

B. Identifikasi Masalah

Dari latar belakang di atas, dapat diidentifikasi beberapa permasalahan sebagai berikut:

- i. Ruas-ruas jalan saat ini semakin dipadati oleh kendaraan roda dua dan roda empat. Hal ini menunjukkan keadaan ekonomi masyarakat yang baik. Namun demikian, kepadatan lalu lintas juga memunculkan dampak negatif, di antaranya konsumsi bahan bakar yang makin meningkat dan waktu tunggu sampai tujuan yang makin lama.
- ii. Fisika bukan hanya sebagai ilmu yang mempelajari tentang gejala alam, tetapi juga usaha manusia untuk memahami gejala fisis. Oleh karena itu, usaha ini juga diwujudkan dalam memberikan alternatif solusi terhadap berbagai permasalahan nyata di masyarakat.
- iii. Salah satu solusi untuk menangani permasalahan kepadatan lalu lintas di jalan searah adalah dengan pemodelan matematis menggunakan TASEP dengan syarat batas terbuka dan aturan dinamika *sequential* dan *parallel updatings*.

C. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini dapat diberikan sebagai berikut:

- i. Sistem kekisi yang digunakan hanya dibatasi sampai satu dimensi (1D). Dengan demikian, jenis ruas jalan yang dipertimbangkan di sini adalah sebuah jalan searah dimana kendaraan tidak dapat berdampingan (tidak dapat saling mendahului).
- ii. Partikel yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi untuk partikel sejenis (monokomponen). Dengan demikian, di sini diandaikan kendaraan yang sejenis yang melalui jalan searah.
- iii. Syarat batas yang digunakan dalam pemodelan ini adalah syarat batas terbuka. Hal ini berarti kendaraan dapat masuk ataupun keluar ruas jalan dengan laju tertentu.
- iv. Aturan dinamika yang digunakan dalam penelitian ini adalah *sequential* dan *parallel updatings*. Hal ini memiliki arti gerak kendaraan dapat diandaikan sebagai gerak *sequential* ataupun *parallel*. Keterangan yang lebih jelas tentang kedua aturan dinamika ini dapat dibaca pada bagian **Dasar Teori**.
- v. Besaran fisis yang akan diamati dalam penelitian ini dibatasi pada kerapatan dan rapat arus partikel. Hal ini berarti, kuantitas fisis yang diamati pada lalu lintas kendaraan adalah kepadatan dan arus lalu lintas.

D. Rumusan Masalah

Dari identifikasi dan batasan masalah di atas, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- i. Bagaimana memodelkan lalu lintas kendaraan pada jalan searah melalui TASEP dengan syarat batas terbuka dan periodik, dan dinamika *sequential* serta *parallel updatings*?
- ii. Bagaimana kerapatan dan rapat arus partikel yang dihasilkan dengan model TASEP?
- iii. Bagaimana interpretasi kerapatan dan rapat arus partikel sebagai kepadatan dan arus lalu lintas kendaraan?

E. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, dapat disusun tujuan penelitian sebagai berikut:

- i. Memodelkan lalu lintas kendaraan pada jalan searah menggunakan TASEP dengan syarat batas terbuka dan periodik, dan aturan dinamika *sequential* serta *parallel updatings*.
- ii. Menentukan dan mengkaji kerapatan dan rapat arus partikel yang diperoleh dari model TASEP, baik menggunakan analisis teoretik, numerik, maupun simulasi.

- iii. Menginterpretasi hasil dari tujuan ii) untuk kepadatan dan arus lalu lintas kendaraan pada jalan searah.

F. Manfaat Penelitian

Berbagai manfaat dapat diambil dari penelitian ini, yaitu:

- i. **Bagi peneliti.** Dapat mengaplikasikan ilmu Fisika, terutama analisis numerik dan simulasi, untuk turut serta mencari solusi atas permasalahan semakin padatnya lalu lintas kendaraan di jalan searah.
- ii. **Bagi institusi.** Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi untuk penelitian lainnya yang terkait.
- iii. **Bagi pemerintah.** Penelitian ini dapat dijadikan sebagai pertimbangan untuk menyelesaikan masalah kepadatan lalu lintas kendaraan di jalan searah.

BAB II

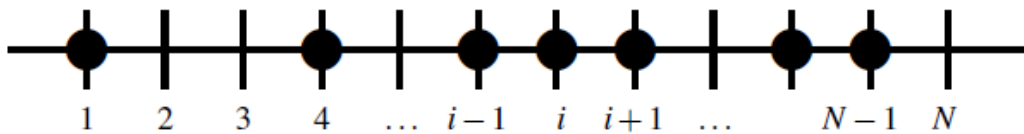
TINJAUAN PUSTAKA

A. Sistem Kekisi Satu Dimensi (1D)

Dimisalkan sebuah sistem kekisi satu dimensi (1D), \mathcal{L} , dengan kekisi $i = 0, 1, 2, \dots, N \in \mathcal{L}$, dengan N adalah jumlah kisi, dan $i = 0$ adalah kisi ke-nol dari \mathcal{L} . Kekisi \mathcal{L} dapat ditempati oleh partikel dengan interaksi inti keras pada kisi-kisi $1 \leq i \leq N$. Jika sebuah partikel menempati kisi ke- i , maka partikel tersebut akan menolak (mengeksklusi) sebarang partikel lainnya yang berusaha untuk menempati kisi ke- i tersebut (eksklusi kisi). Jika $\tau_{i,n}$ adalah angka okupansi kisi ke- i pada keadaan mikroskopis n , maka kuantitas ini dapat didefinisikan sebagai,

$$\tau_{i,n} = \begin{cases} 1, & \text{jika kisi ke- } i \text{ dari keadaan mikroskopis } n \text{ ditempati,} \\ 0, & \text{selain itu,} \end{cases} \quad (1)$$

Pada sebarang waktu tertentu t sebuah keadaan (konfigurasi) mikroskopis n dapat dispesifikasi, yang dinyatakan sebagai $\{\tau_{i,n}\} = \{\tau_{1,n}, \tau_{2,n}, \tau_{3,n}, \dots, \tau_{N-1,n}, \tau_{N,n}\}$. Sehingga, n dispesifikasi dengan suatu barisan angka okupansi pada tiap kisi. Untuk mengilustrasikan hal ini, sebuah contoh diberikan oleh **Gambar 2** di bawah ini.



Gambar 2. Sebuah contoh keadaan konfigurasi sistem kekisi, \mathcal{L} , dalam 1D dengan N -kekisi. Kekisi 1D terdiri dari sebuah himpunan kisi-kisi (garis-garis vertikal) yang jarak antar kisinya sama. Kisi-kisi ini dapat dilabeli dengan $i \in \mathcal{L}$, yang dimulai dari $i = 1$ (kisi paling kiri) sampai $i = N$ (kisi paling kanan). Partikel (lingkaran terisi penuh) dapat menempati kisi-kisi dalam \mathcal{L} . Namun demikian, karena interaksi inti keras, hanya satu partikel yang dapat mengisi tiap-tiap kisi. Pada contoh di atas, kisi-kisi $i = 1, 4, i - 1, i, i + 1, N - 2, N - 1$ terisi oleh satu dan hanya satu partikel.

Konfigurasi mikroskopis pada **Gambar 2** dapat dituliskan sebagai berikut: $n = \{1, 0, 0, 1, \dots, 1, 1, 1, \dots, 1, 1, 0\}$, dengan tiga titik menyatakan barisan angka okupansi yang tidak dituliskan secara eksplisit untuk memudahkan penulisan. Fungsi peluang untuk keadaan mikroskopis $n = \{1, 0, 0, 1, \dots, 1, 1, 1, \dots, 1, 1, 0\}$ pada waktu t diberikan oleh $P_n(t)$.

B. Partikel dengan Interaksi Inti Keras (*Hard Core*)

Interaksi inti keras murni merupakan interaksi antar atom yang paling sederhana [11,12]. Bentuk dari interaksi ini adalah adanya potensial tolak-menolak yang tak berhingga jika jarak antar pusat partikel lebih kecil daripada nilai tertentu σ . Selain itu, tidak ada interaksi pada jarak yang lebih jauh daripada σ . Dengan demikian, untuk jarak yang lebih jauh daripada σ , partikel-partikel dianggap sebagai partikel bebas. Interaksi ini sering digunakan untuk memodelkan partikel-partikel fluida klasik, cair, maupun gas, terutama melalui mekanika statistika setimbang. Model-model fluida yang didasarkan pada interaksi inti keras mulai dipandang penting sekitar pertengahan abad ke-20 seiring dengan berkembangnya kemampuan komputer [13, 14, 15]. Pada awalnya, dilakukan simulasi komputer partikel-partikel inti keras untuk mempelajari persamaan keadaan model tersebut, dan juga untuk menyelesaikan perbedaan pendapat tentang keberadaann transisi fase dari padat ke cair untuk sistem koloid dengan tolakan murni [16, 17, 18]. Suatu potensial tarik-menarik dapat ditambahkan ke dalam interaksi inti keras untuk mempelajari partikel inti keras dengan gaya adhesi di permukaan [19]. Aplikasi lainnya dari model inti keras adalah analisis pengendapan molekul DNA [20] dan penyelidikan tentang perubahan wujud dari padat ke cair untuk fluida sederhana [21]. Interaksi inti keras ini digunakan untuk mendeskripsikan model TASEP pada bagian berikutnya dalam proposal penelitian ini.

Agar sebarang model fluida dapat dideskripsikan secara lengkap, maka potensial interatomiknya, U , dalam Hamiltonian sistem harus dapat dispesifikasi terlebih dahulu. Fluida dengan partikel inti keras murni memberikan salah satu interaksi interatomik yang paling sederhana untuk pendekatan U . Potensial ini, sebagai fungsi jarak, r , dapat dituliskan secara sederhana sebagai [12]:

$$U(r) = \begin{cases} \infty, & \text{if } 0 \leq r \leq \sigma, \\ 0, & \text{if } r \geq \sigma, \end{cases} \quad (2)$$

dengan σ adalah jarak (jangkauan) potensial tolak-menolak tak berhingga. Persamaan (2) di atas menyatakan bahwa potensial tolakan tak-berhingga akan terjadi antara sebarang dua partikel sejenis sehingga kedua partikel tersebut tidak dapat saling tumpah tindih. Inilah asal dari istilah ‘inti keras’, yakni partikel-partikel berperilaku seperti ‘kelereng’ yang tidak dapat saling mendekati jika jaraknya kurang dari σ . Model ini merupakan sebuah idealisasi dari fakta bahwa pada jarak pemisah tertentu, dalam hal ini σ , dua partikel akan cenderung untuk saling menolak sehingga diameter partikel-partikel tersebut adalah σ .

C. *Totally Asymmetric Exclusion Process*

Dalam bagian ini, akan dijelaskan secara umum tentang model fisis yang dikenal sebagai *totally asymmetric exclusion process* (TASEP). TASEP dalam satu dimensi (1D) adalah sebuah model lompatan partikel yang digunakan untuk mempelajari sistem-sistem tak-setimbang. TASEP merupakan sebuah model matematis dimana partikel-partikel (inti keras) yang mengisi kekisi 1D dapat melompat ke kisi tetangganya selama kisi tetangga tersebut tidak terisi partikel lain. Lompatan ini terjadi hanya pada satu arah saja, yaitu ke kanan yang menghasilkan gerak asimetrik partikel pada kekisi. Berbagai skenario dinamika dapat diberikan pada model ini agar arus dalam sistem tetap terjaga. Selain itu, berbagai macam kondisi batas dapat disyaratkan pada TASEP, antara lain batas terbuka dan batas periodik. Syarat batas ini dapat mengakibatkan perilaku fisis yang menarik pada TASEP. Sebagai contoh, dengan adanya syarat batas terbuka, dimana partikel-partikel dapat masuk atau keluar dari kekisi, berbagai gambaran fisis yang menarik dapat ditemukan, antara lain transisi fase pada keadaan tunak [7,9,22]. Hal inilah yang menyebabkan model TASEP dipelajari secara intensif. Di sisi lain, syarat batas periodik menghasilkan geometri kekisi berbentuk cincin sehingga jumlah partikel di dalam kekisi bernilai tetap. Sehingga, diperoleh sistem setimbang dimana partikel melompat secara acak sepanjang kisi-kisi dengan peluang yang sama [23]. Namun, jika laju lompatan partikel dibuat tak homogen, sebuah transisi fase dari kerapatan rendah ke kerapatan tinggi dapat terjadi [24]. Model ini awalnya digunakan untuk mempelajari kinetika biopolimerisasi pada cetakan *nucleic acid* [2,3]. Pada perkembangannya, model TASEP telah dipelajari secara lebih luas sebagai salah satu model dasar untuk transpor satu dimensi, dimana aplikasinya terkait dengan transpor intra-sel [4,5], dan lalu lintas dan transpor dalam media berpori. Model ini juga dapat digunakan untuk

studi kelayakan jaringan nirkabel [6]. Perlu dicatat pula bahwa hasil-hasil eksak model TASEP untuk keadaan stasioner telah diperoleh [9,22]. Bahasan ini akan dibatasi untuk model TASEP dalam kekisi \mathcal{L} satu dimensi.

D. Syarat Batas

Dua jenis kondisi batas biasanya digunakan dalam TASEP, yakni: kondisi batas terbuka dan batas periodik. Untuk batas terbuka, sebuah partikel dapat memasuki kekisi, \mathcal{L} , dengan laju masukan $\alpha(t)$ menuju kisi paling kiri, $i = 1$, jika tidak terdapat sebuah partikel yang menempati kisi di $i = 1$ tersebut. Selanjutnya, jika terdapat sebuah partikel di kisi terakhir, $i = N$, maka partikel tersebut dapat keluar dari kisi \mathcal{L} dengan laju lompatan keluar sebesar $\beta(t)$.

Untuk kondisi batas periodik, kisi paling kiri dan kisi paling kanan disambungkan sehingga terbentuk sebuah lingkaran tertutup. Syarat perlu untuk kondisi batas adalah

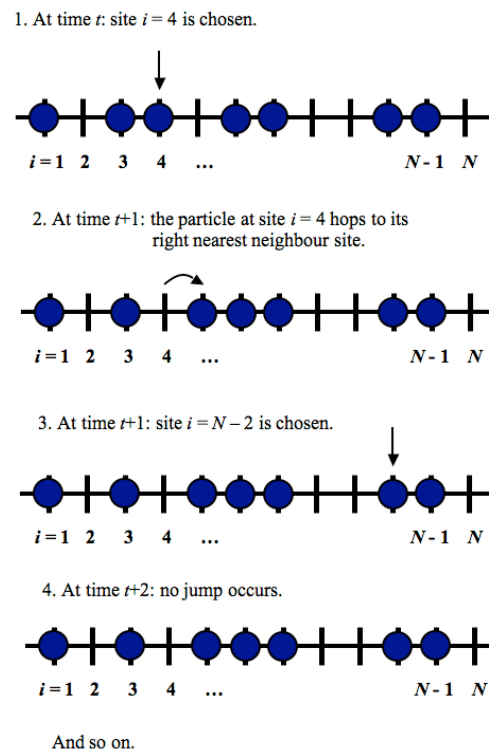
$$\tau_1 = \tau_{N+1} \quad \text{dan} \quad \tau_N = \tau_0. \quad (3)$$

E. Aturan Dinamika *Sequential Acak*

Pada tiap langkah waktu, dinamika *sequential acak* mensyaratkan bahwa sebuah kisi dipilih secara acak dengan peluang masing-masing kisi sebesar $\frac{1}{(N+1)}$. Kisi ke-nol juga diperhitungkan sehingga terdapat sejumlah $(N + 1)$ buah kisi. Jika salah satu kisi ($1 \leq i \leq N - 1$) terpilih dan terdapat sebuah partikel yang menempati kisi tersebut, maka partikel tersebut dapat melompat ke kisi kanan tetangga terdekatnya dengan laju sebesar $k_{i(i+1)}(t)$, selama tidak ada partikel di kisi $(i + 1)$ [tetangga terdekat sebelah kanan]. $k_{i(i+1)}(t)$ adalah laju lompatan sebuah partikel dari kisi i menuju kisi $i + 1$ pada waktu t . Sebuah contoh proses *sequential acak* dapat dilihat pada **Gambar 3**. Sesuai dengan **Gambar 3** tersebut, jika pada suatu waktu t sistem tersebut berada pada keadaan mikroskopis $n = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{N-1}, \tau_N\}$, maka pada langkah waktu berikutnya, $t + 1$, keadaan tersebut memiliki peluang untuk berada pada keadaan yang sama n (jika tidak ada partikel yang melompat) atau terbaharui (*updated*) menuju keadaan mikroskopis lain yang **mungkin**, $n' = \{\tau_{1,n'}, \tau_{2,n'}, \dots, \tau_{N-1,n'}, \tau_{N,n'}\}$, dengan memenuhi kaitan berikut:

$$\tau_{i,n'} = \begin{cases} \tau_{i,n} \tau_{i+1,n'} & \text{dengan peluang } \frac{k_{i(i+1)}(t)}{N+1}, \\ \tau_{i,n} + [1 - \tau_{i,n}] \tau_{i-1,n'} & \text{dengan peluang } \frac{k_{(i-1)i}(t)}{N+1}, \\ \tau_{i,n} & \text{dengan peluang } 1 - \frac{1}{N+1} [k_{i(i+1)}(t) + k_{(i-1)i}(t)]. \end{cases} \quad (4)$$

Persamaan yang pertama di atas, berlaku untuk kisi i yang di-*update*. Persamaan kedua diberikan jika kisi $i - 1$ yang di-*update*, sedangkan semua kisi lainnya tidak di-*update* menurut persamaan ketiga. Sebuah kasus yang menarik adalah model TASEP dengan aturan dinamika sequensial acak dengan laju lompatan tetap sepanjang kekisi, yakni $k_{i(i+1)}(t) = 1$, untuk $1 \leq i \leq N - 1$.



Gambar 3. Ilustrasi model TASEP menggunakan aturan dinamika sekuensial acak.

F. Aturan Dinamika Paralel

Syarat yang berbeda diberikan untuk aturan dinamika *parallel*. Untuk jenis dinamika ini, semua partikel yang tetangga kanan terdekatnya kosong, dapat melompat ke tetangga terdekatnya tersebut dengan laju lompatan $k_{i(i+1)}(t)$. **Gambar 4** memperlihatkan sebuah contoh dari aturan dinamika *parallel*. Dengan berlalunya waktu, sejumlah partikel akan melompat bersamaan sehingga dihasilkan gerak *parallel* pada tiap langkah waktu. Oleh karena itu, jika pada waktu t sebuah keadaan mikroskopis diberikan oleh $n = \{\tau_{i,n}\}$, maka sebuah transisi dari keadaan n menuju keadaan $n' = \{\tau_{i,n'}\}$ pada waktu $t + 1$ diberikan oleh:

$$\tau_{i,n'} = \begin{cases} \tau_{i,n}\tau_{i+1,n} & \text{dengan peluang } k_{i(i+1),n}(t), \\ \tau_{i-1,n}(1 - \tau_{i,n}) & \text{dengan peluang } k_{(i-1)i}(t), \\ \tau_{i,n} & \text{dengan peluang } 1 - k_{i(i+1)}(t), \end{cases} \quad (5)$$

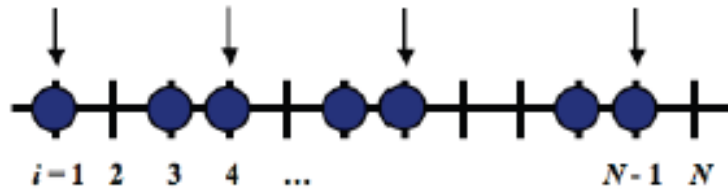
dengan persamaan pertama dan kedua digunakan jika kisi yang di-*update*, masing-masing adalah i dan $i - 1$. Persamaan ketiga digunakan untuk meng-*update* partikel-partikel yang tidak melompat.

Sebagaimana dalam dinamika *sequential* acak, sebuah kasus yang cukup diminati untuk ditelaah dalam dinamika paralel adalah pemilihan laju lompatan tetap sepanjang kekisi, yakni $k_{i(i+1)}(t) = 1$ untuk $1 \leq i \leq N - 1$. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel-partikel dengan tetangga kanan terdekatnya kosong akan melompat ke kisi tetangga kanan terdekat tersebut, pada tiap langkah waktu, $t \rightarrow t + 1$, dengan pasti (peluang melompat bernilai 1). Sebagai contoh, dimisalkan terdapat sebuah konfigurasi mikroskopis yang lengkap yakni $n = \{100101110110\}$, dimana tiap pasangan kisi yang terisi (1) dan kosong (0) dicetak tebal. Dengan demikian, pada waktu $t + 1$, terjadi perubahan konfigurasi mikroskopis sebagai berikut $n' = \{010011101101\}$.

G. Kerapatan dan Rapat Arus

Dua kuantitas fisis yang akan dipelajari dalam model TASEP ini adalah kerapatan dan rapat arus. Kedua kuantitas ini dapat berubah menurut waktu (t) dan posisi (i).

1. At time t ,



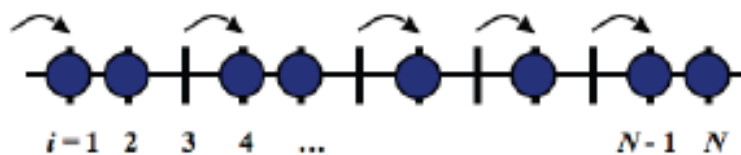
2. At time $t+1$: all particles with empty right-nearest neighbours jump to their right-nearest neighbour, respectively.



3. At time $t+1$:



4. At time $t+2$: all particles with empty right-nearest neighbours jump to their right-nearest neighbour, respectively.



And so on.

Gambar 4. Ilustrasi model TASEP menggunakan aturan dinamika paralel.

Untuk model TASEP, kuantitas ini masing-masing dinotasikan sebagai $\rho_i(t)$ dan $J_{i(i+1)}(t)$, yang berarti kerapatan pada kisi i pada waktu t dan rapat kelajuan partikel dari kisi i menuju kisi $i + 1$ pada waktu t . Secara umum, kerapatan dan lajunya dapat dikaitkan secara fenomenologis melalui,

$$\mathbf{J}_i(t) = \rho_i(t)\mathbf{v}_i(t), \quad (6)$$

dimana $\mathbf{J}_i(t)$ dan $\mathbf{v}_i(t)$ adalah laju kerapatan dan rapat kecepatan aliran partikel di kisi i pada waktu t . Untuk model TASEP yang memenuhi kekekalan lokal untuk jumlah partikel, berlaku persamaan kontinuitas sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_i(t) = -\frac{\partial \rho_i(t)}{\partial t}. \quad (7)$$

Untuk sistem yang diskrit, dapat didefinisikan

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_i(t) \rightarrow J_{i(i+1)}(t) - J_{(i-1)i}(t).$$

Sedemikian sehingga, persamaan kontinuitas (7) dapat dituliskan sebagai

$$\frac{\partial \rho_i(t)}{\partial t} = J_{i(i+1)}(t) - J_{(i-1)i}(t). \quad (8)$$

dengan parameter waktu, t , dapat bersifat diskrit atau kontinu, dan $J_{(i-1)i}(t)$ adalah rapat arus yang menghubungkan kisi $i - 1$ ke kisi i pada waktu t . Sehingga, $\rho_i(t)$ dapat ditentukan dari rapat arus $J_{(i-1)i}(t)$ dan $J_{i(i+1)}(t)$ dengan mengintegrasikan persamaan (8) untuk waktu yang kontinu, yaitu:

$$\rho_i(t) = \rho_i(0) + \int_0^t dt' [J_{i(i+1)}(t') - J_{(i-1)i}(t')], \quad (9)$$

dengan $\rho_i(t = 0)$ adalah kondisi awal kerapatan di kisi i pada waktu awal $t = 0$.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat dilakukannya penelitian ini adalah Laboratorium Fisika Komputasi, Jurusan Pendidikan Fisika, FMIPA, UNY. Sedangkan waktu pelaksanaan penelitian ini adalah dari bulan Juni 2013 sampai bulan November 2013.

B. Alat dan Bahan yang Diperlukan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk *hardware* dan *software*.

Berbagai *hardware* yang digunakan dalam penelitian ini adalah

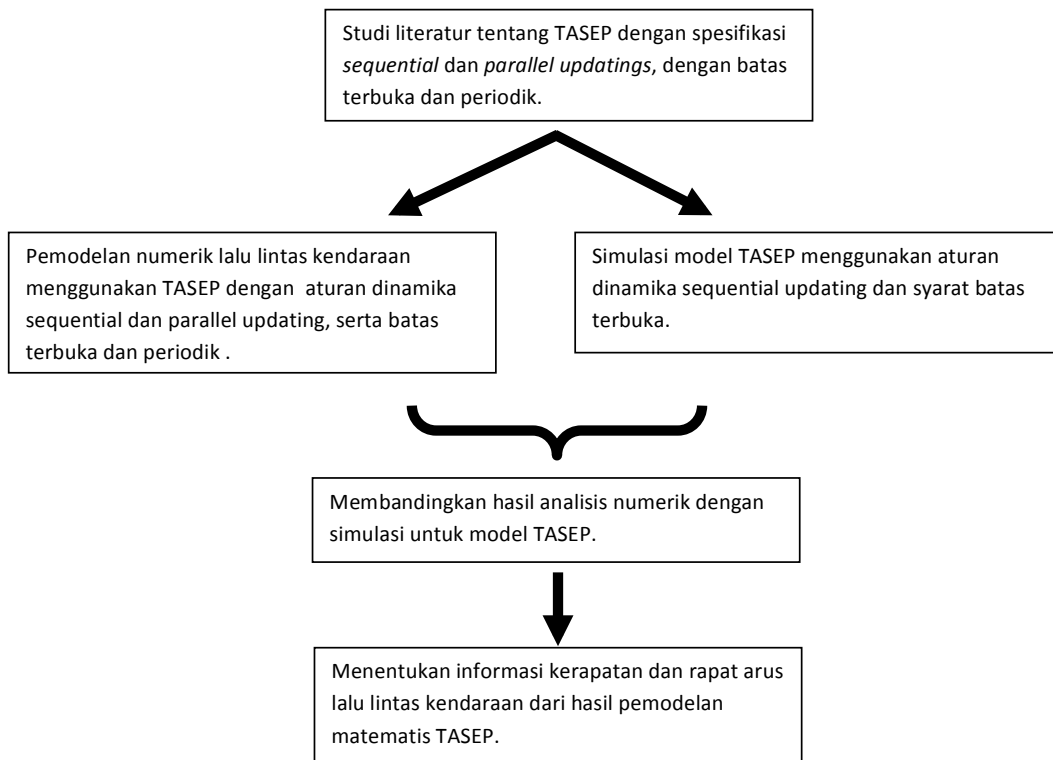
1. komputer Apple (Mac) (1 buah)
2. laptop Byon Intel(R) Atom(TM), CPU N280@1.66GHz, 980 MHz, 0.99 (1 buah)
3. Kertas dan Alat Tulis (secukupnya)
4. CD (secukupnya)

Berbagai *software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah

1. Mac
2. Microsoft Windows XP Home Edition Versi 2002 Service Pack 2
3. Dev C++ versi 4.9.9.2
4. Microsoft Office Excel 2007
5. Microsoft Office Words 2007

C. Skema Penelitian

Skema penelitian ini dapat diberikan sebagai berikut:



BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam bagian ini, akan dijelaskan berbagai hasil yang telah diperoleh dari penelitian. Sebagaimana telah dideskripsikan di atas, TASEP adalah sebuah model matematis yang dapat digunakan untuk mempelajari berbagai gejala transpor, baik dalam ilmu Biologi maupun Fisika. Dalam penelitian ini, model matematis ini digunakan untuk mempelajari gejala fisis gerak kendaraan di jalan searah. Pemodelan ini dilakukan dengan mengidentifikasi obyek-obyek fisis yang penting pada lalu lintas kendaraan, dan mengasosiasikan obyek-obyek tersebut dengan komponen-komponen dalam TASEP. Selanjutnya, dipelajari perilaku fisis model TASEP, terutama untuk menentukan kerapatan dan rapat arus. Akhirnya, perilaku fisis yang diperoleh diinterpretasi untuk lalu lintas kendaraan di jalan searah.

Jika gejala lalu lintas kendaraan dianalisis, tentu terdapat berbagai macam faktor yang menentukan kepadatan dan arus lalu lintas. Namun demikian, untuk pemodelan ini, dipilih beberapa komponen terpenting yang mewakili perilaku fisis lalu lintas kendaraan di jalan searah. Komponen-komponen ini terbagi menjadi dua, yakni komponen *motile* (komponen bergerak) dan komponen *track* (lintasan). Dari kedua komponen di atas, dapat diperoleh asosiasi antara lalu lintas kendaraan di jalan searah dan TASEP yang diperlihatkan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Asosiasi antara lalu lintas kendaraan di jalan searah dengan model TASEP.

No.	komponen	lalu lintas kendaraan di jalan searah	model TASEP
1.	<i>motile</i> (bergerak)	kendaraan	partikel inti keras
2.	<i>track</i> (lintasan)	jalan searah (kontinu)	kekisi (diskrit) dengan syarat batas terbuka dan periodik

Dari **Tabel 1**, dapat diamati kesederhanaan asosiasi antara lalu lintas kendaraan di jalan searah dan model TASEP. Inilah salah satu keuntungan menggunakan model TASEP untuk mempelajari perilaku kendaraan di jalan searah. Hanya ada dua komponen terpenting yang

diidentifikasi dari lalu lintas kendaraan di jalan searah, yaitu kendaraan dan jalan searah. Dalam model TASEP, masing-masing komponen tersebut, diasosiasikan dengan partikel inti keras dan kekisi dengan syarat batas terbuka dan periodik. Kendaraan pada dasarnya bersifat *rigid* atau kaku. Demikian pula dengan partikel inti keras. Sesuai dengan persamaan (2), potensial partikel inti keras bernilai tak berhingga sampai pada jarak tertentu, atau σ . Hal ini berarti, interaksi antar partikel bersifat tolak-menolak pada jarak sampai dengan σ , atau dengan kata lain, partikel-partikel inti keras tidak boleh saling *overlap*. Jika sebuah partikel telah menempati kekisi tertentu, i , maka kekisi tersebut tidak boleh terisi oleh partikel lain. Hal ini mirip dengan kendaraan yang ada di jalan searah. Jika sebuah kendaraan telah menempati posisi tertentu di jalan searah maka tentunya tidak ada kendaraan lain yang dapat berada di posisi yang sama. Lebih jauh lagi, partikel inti keras juga menunjukkan bahwa kendaraan di jalan searah tidak saling bertabrakan.

Asosiasi berikutnya adalah elemen *track* atau lintasan. Dalam hal ini jalan searah diasosiasikan dengan sistem kekisi pada model TASEP. Baik jalan searah maupun sistem kekisi berada pada ruang satu dimensi. Tentu saja terdapat perbedaan signifikan antara jalan searah dan sistem kekisi, yakni perubahan dari sistem yang kontinu (jalan searah) ke sistem diskrit (kekisi). Hal ini menunjukkan bahwa kendaraan yang sifat gerakannya tidak terputus-putus (kontinu) pada jalan searah diasosiasikan sebagai partikel yang ‘melompat’ dari satu kisi ke kisi tetangga kanan terdekatnya. Justifikasi terhadap perubahan dimensi spatial dari kontinu ke diskrit tidak semudah pemodelannya. Justifikasi ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Diandaikan sebuah sistem kekisi dengan ukuran panjang tertentu yang tetap, yakni L . Diandaikan pula jarak antar kisi adalah a dan jumlah kisi dalam sistem adalah N . Dengan demikian, sebuah partikel dapat melompat dari kisi i menuju kisi $i + 1$ pada waktu tertentu sejauh a . Secara matematis, dapat diperoleh hubungan

$$a = \frac{L}{N - 1}. \quad (10)$$

Persamaan (10) menyatakan bahwa jarak (interval) antar dua kisi yang berdekatan, a , dapat divariasikan dengan mengubah jumlah kekisi, N . Semakin banyak kisi dalam sistem, dengan panjang kisi yang tetap, maka a akan makin kecil. Hal ini berarti, lompatan partikel makin pendek. Selanjutnya, jika $N \rightarrow \infty$, maka $a \rightarrow 0$, dengan L tetap. Hal ini menandakan bahwa

partikel tidak lagi melakukan ‘lompatan’ dan nampak melakukan pergeseran yang kontinu. Oleh karena itu, dengan menambah jumlah kisi (sebanyak mungkin), maka sistem yang diskrit (partikel melompat), menjadi sistem yang kontinu (partikel bergeser).

Di sisi lain, akibat kesederhanaan pemodelan ini pula yang menyebabkan adanya ketidaksesuaian antara gejala lalu lintas kendaraan dengan TASEP. Dengan adanya pemodelan TASEP dalam satu dimensi ini belum dapat dipelajari bagaimana kendaraan dapat saling mendahului. Jelas dalam pemodelan TASEP satu dimensi, sebuah partikel yang berada di belakang partikel kedua tidak dapat mendahului partikel kedua. Hal ini justru disebabkan oleh adanya interaksi inti keras yang telah dijelaskan di atas. Selanjutnya, dalam penelitian ini, diasumsikan bahwa kendaraannya sejenis atau paling tidak ukurannya relatif sama. Hal ini tercermin dari jangkauan interaksi inti keras antar partikel yang hanya mencapai σ . Sedangkan dalam kenyataannya, ukuran kendaraan jelas bervariasi dari yang kecil sampai yang besar. Ketidaksesuaian yang lain adalah sebagaimana dijelaskan di atas, bahwa kendaraan bergerak secara kontinu sedangkan partikelnya melompat dari satu kisi ke kisi yang lain. Kelemahan-kelemahan dalam pemodelan ini dapat diatasi dengan melakukan modifikasi terhadap model TASEP. Modifikasi-modifikasi model TASEP tidak akan dibahas dalam laporan ini. Namun demikian, telah banyak artikel-artikel yang membahas tentang modifikasi model TASEP agar lebih sesuai dengan gejala yang ingin dimodelkan. Tentu saja modifikasi semacam ini akan memberikan kompleksitas tertentu pada TASEP.

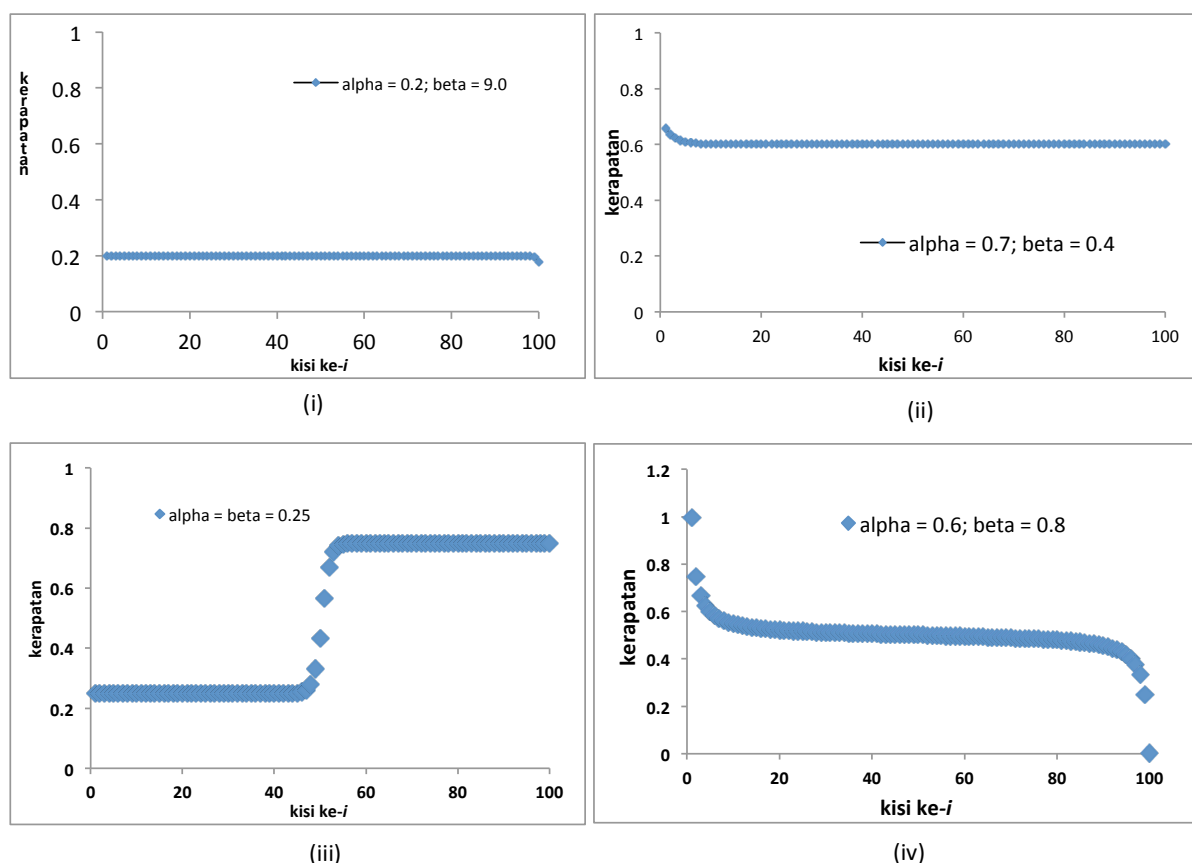
Hal lain yang perlu dibahas dalam pemodelan ini adalah tentang syarat batas dan aturan dinamika dalam model TASEP satu dimensi. Syarat batas mengatur bagaimana perilaku partikel di ujung-ujung kekisi, sedangkan aturan dinamika mengatur bagaimana partikel-partikel bergerak (melompat) dalam kekisi. Sebagaimana telah dipaparkan di atas, syarat batas yang biasanya digunakan untuk pemodelan TASEP adalah syarat batas terbuka dan syarat batas tertutup (periodik). Syarat batas terbuka menyaratkan adanya reservoir partikel di kedua ujung-ujung kekisi. Satu reservoir berperan sebagai sumber partikel (*source*), sedangkan reservoir yang lainnya berperan sebagai penampung partikel (*sink*). Dengan demikian, partikel dapat memasuki kisi pertama, $i = 1$, dari sumber partikel dengan laju masukan (*input rate*) α , sedangkan partikel yang berada pada kisi akhir, $i = N$, dapat keluar dari sistem kekisi menuju

penampung partikel dengan laju keluaran (*output rate*) β . Nilai dari α dan β dapat divariasikan dari 0.0 sampai 1.0. $\alpha = 0$ berarti laju lompatan partikel menuju kisi $i = 1$ adalah nol atau partikel tidak dapat melompat ke kisi $i = 1$ dari reservoir, sedangkan $\beta = 0$ berarti laju lompatan keluar sistem menuju penampung partikel adalah nol atau partikel tidak dapat meninggalkan kisi terakhir menuju reservoir. Sebaliknya, $\alpha = 1$ berarti partikel dengan pasti melompat ke kisi $i = 1$ dari reservoir, sedangkan $\beta = 1$ berarti partikel dengan pasti melompat dari kisi $i = N$ menuju reservoir (penampung partikel). Contoh syarat batas ini sudah memberikan gambaran kualitatif bagaimana TASEP dapat memodelkan lalu lintas kendaraan di jalan searah. Jika terdapat sejumlah N kekisi, sedangkan di ujung-ujung kekisi diberikan nilai $\alpha = 1.0$ dan $\beta = 0.0$, dan saat $t = 0$ tidak ada partikel dalam sistem kisi, maka dengan berlalunya waktu, kekisi akan terus terisi partikel dan menumpuk, sampai akhirnya seluruh kisi terisi partikel. Hal ini identik dengan sebuah jalan searah yang salah satu ujung jalannya ditutup, sedangkan ujung jalan lainnya terus dilalui kendaraan sehingga terjadi kemacetan.

Syarat batas periodik diperoleh dengan menyatukan kisi pertama dan kisi terakhir sehingga sistem kekisinya berbentuk cincin. Dalam hal ini, tidak terdapat lagi laju masukan dan laju keluaran. Lebih jauh lagi, karena syarat batas yang tertutup ini (tidak diperbolehkan partikel masuk ataupun keluar), maka jumlah partikel di dalam sistem tetap (konstan). Partikel hanya melompat dari satu kisi ke kisi lainnya, mengelilingi kekisi. Hal ini menyebabkan semua konfigurasi mikroskopis (yakni keadaan mikro dengan susunan okupansi tertentu) dapat diakses. Dengan kata lain, tidak ada laju transisi dari satu konfigurasi mikroskopis ke konfigurasi mikroskopis lainnya yang bernilai nol. Hal ini berarti bahwa model TASEP dengan syarat tertutup ekuivalen dengan sistem yang berada dalam kesetimbangan. Namun demikian, modifikasi terhadap laju lompatan dari kisi i ke kisi $i + 1$, $k_{i(i+1)}$, dapat menyebabkan dinamika partikel dalam kekisi berubah.

Terdapat pula aturan dinamika yang hendaknya dispesifikasi untuk model TASEP. Pada prinsipnya, aturan dinamika menentukan bagaimana partikel bergerak dalam kekisi. Dalam model TASEP terdapat dua aturan dinamika yang telah menjadi standar, yakni *sequential acak updating* dan *paralel updating*. Untuk aturan dinamika yang pertama kali disebutkan, setiap langkah waktu, hanya terdapat paling banyak satu partikel yang dapat melompat dari kisi i ke

kisi $i + 1$. Sedangkan untuk aturan dinamika yang berikutnya, setiap langkah waktu, setiap partikel yang kekisi tetangga kanannya kosong (tidak terisi partikel) akan melompat ke kisi tetangga kanan secara bersamaan. Dalam konteks lalu lintas kendaraan di jalan searah, nampak bahwa aturan dinamika paralel updating yang lebih cocok diterapkan dalam model TASEP. Secara alami, jika kendaraan melihat ada ruang kosong di depannya, maka kendaraan tersebut akan mengisi ruang kosong tersebut. Maka, jika terdapat banyak kendaraan yang ada ruang kosong di depannya, maka secara bersamaan kendaraan tersebut akan mengisi ruang kosong di depannya. Namun demikian, secara kualitatif tidak ditemukan perbedaan fase antara kedua aturan dinamika ini. Dari model TASEP, baik untuk sequential maupun paralel *updating*, dihasilkan empat jenis fase kerapatan, yakni: kerapatan tinggi (*high density* – HD), kerapatan rendah (*low density* - LD), arus maksimal (*maximal current* - MC), dan fase koeksisten (*coexistence phase* - CP). Hanya saja, detail profil kerapatannya yang berbeda antara kedua aturan dinamika tersebut.

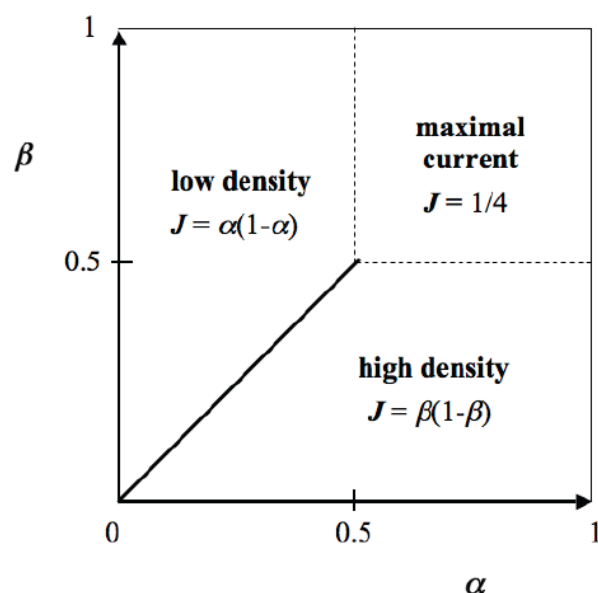


Gambar 5. Berbagai profil kerapatan untuk model TASEP dengan aturan dinamika sequential *updating* dan syarat batas terbuka.

Selanjutnya, dibahas tentang berbagai hasil kerapatan dan rapat arus model TASEP dengan berbagai syarat batas dan aturan dinamika. Pertama, akan dijelaskan berbagai hasil untuk kerapatan dan rapat arus model TASEP dengan syarat batas terbuka dan aturan dinamika sequential *updating*. Berbagai grafik yang disajikan di bawah ini (**Gambar 5**) didasarkan pada variabel bebas laju masukan, α , dan laju keluaran, β . Gambar 5 terdiri dari empat grafik yang mengkili berbagai fase kerapatan untuk model TASEP dengan syarat batas terbuka dan aturan dinamika sequential *updating*. Gambar 5(i) adalah profil kerapatan untuk $\alpha = 0.2$ dan $\beta = 0.9$. Dapat diamati bahwa profil kerapatannya datar sepanjang kekisi dengan nilai 0.2, kecuali di ujung akhir kisi yang sedikit turun. Nilai kerapatan *bulk* (bongkahan) yang bernilai di bawah 0.5 berarti kerapatannya rendah, sehingga fase ini disebut fase kerapatan rendah (LD). Fase ini diperoleh untuk $\alpha < \beta$ dan $\alpha < 0.5$. Dapat diamati bahwa besar kerapatan *bulk*-nya mengikuti laju masukan. Hal ini berarti bahwa kerapatan LD ditentukan oleh laju masukan yang ditetapkan. Gambar 5(ii) menunjukkan profil kerapatan untuk $\alpha = 0.7$ dan $\beta = 0.4$. Dapat diamati profil kerapatannya datar sepanjang kekisi dengan nilai 0.6, kecuali di sekitar awal kekisi yang nilainya di atas 0.6. Nilai kerapatan yang berada di atas 0.5 menunjukkan bahwa fase kerapatannya adalah kerapatan tinggi (HD). Profil kerapatan ini diperoleh untuk $\alpha > \beta$ dan $\beta < 0.5$. Gambar 5(iii) menunjukkan profil kerapatan untuk $\alpha = \beta = 0.25$. Dari grafik dapat diamati bahwa dari awal kekisi sampai sekitar pertengahan kekisi, kerapatannya rendah, yaitu 0.25. Sedangkan pada sekitar pertengahan kekisi terjadi perubahan tiba-tiba (*abrupt change*) ke kerapatan tinggi dengan nilai 0.75 sampai akhir kisi. Perubahan tiba-tiba di sekitar pertengahan kisi ini disebut dinding asal (*domain wall*). Dinding asal ini menandakan adanya dua fase yang secara bersamaan muncul, yakni LD dan HD. Dengan demikian, dinding asal ini menandakan pula adanya transisi dari LD ke HD atau sebaliknya. Inilah yang disebut sebagai fase yang saling koeksis (*coexistence phase-CP*). Fase ini terjadi dengan syarat $\alpha = \beta < 0.5$. Terakhir, Gambar 5(iv) menunjukkan profil kerapatan untuk $\alpha = 0.6$ dan $\beta = 0.8$. Dapat diamati bahwa profil kerapatan di sekitar bagian pertengahan kekisi (*bulk*) berada pada sekitar nilai 0.5. Pada daerah sekitar kekisi awal nilai kerapatannya di atas 0.5, sedangkan pada daerah sekitar akhir kekisi nilai kerapatannya di bawah 0.5. Fase kerapatan ini disebut sebagai fase arus maksimum (*maximal current-MC*). Fase kerapatan ini diperoleh untuk $\alpha, \beta \geq 0.5$. Hal ini berarti laju

masukan dan keluaran yang besar (di atas 0.5) menyebabkan partikel terdifusi secara lancar di sepanjang kekisi.

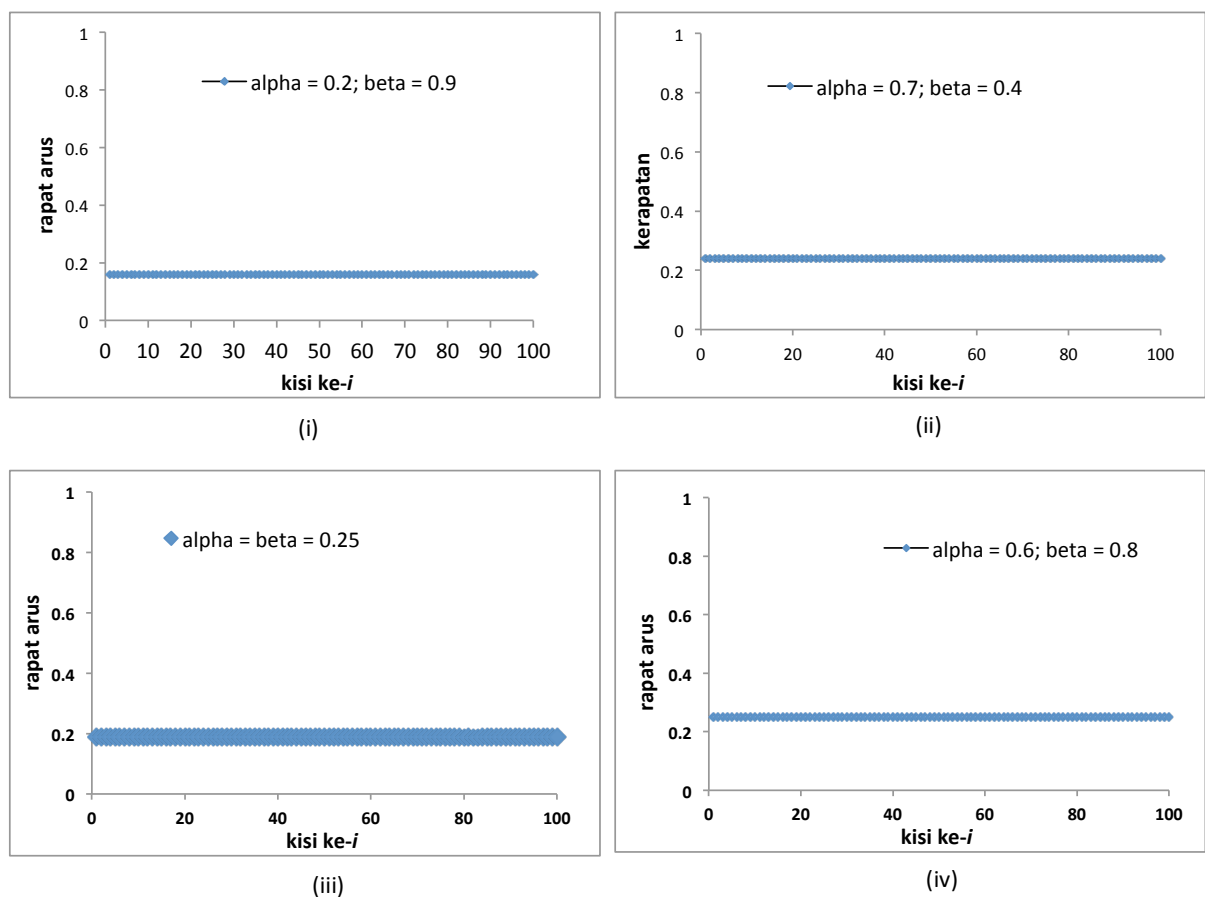
Dari keempat profil kerapatan di atas, dapat diperoleh diagram fase kerapatan untuk model TASEP dengan aturan dinamika sequential *updating* dan syarat batas terbuka. Diagram fase ini mendeskripsikan berbagai fase kerapatan (LD, HD, CP, dan MC) sebagai fungsi dari laju masukan dan keluaran. Dengan berbagai syarat yang telah dijelaskan di atas, dapat diperoleh diagram fase sebagaimana yang dapat diamati pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram fase kerapatan untuk model TASEP dengan aturan dinamika sequential updating dan syarat batas terbuka sebagai fungsi dari laju masukan (sumbu horizontal) dan laju keluaran (sumbu vertikal).

Diagram fase di atas menunjukkan munculnya berbagai macam profil kerapatan berdasarkan laju-laju masukan dan keluaran. Dalam hal ini, sumbu horizontal adalah laju masukan, α , dan sumbu vertikal adalah laju keluaran, β , dengan $0.0 \leq \alpha, \beta \leq 1.0$. Bagian bawah kanan diagram fase merupakan fase HD, yakni $\alpha > \beta$ dan $\beta < 0.5$. Bagian atas kiri diagram fase merupakan fase LD, yakni $\beta > \alpha$ dan $\alpha < 0.5$. Untuk garis tebal diagonal di antara fase LD dan HD adalah fase CP dimana $\alpha = \beta < 0.5$. Sedangkan di bagian atas diagram fase merupakan fase MC dengan $\alpha, \beta \geq 0.5$. Transisi yang terjadi dari LD ke HD atau sebaliknya, merupakan transisi

fase tak kontinu disebabkan terjadinya perubahan fase yang tiba-tiba dari LD ke HD atau sebaliknya. Perubahan fase secara tiba-tiba ini ditandai oleh adanya dinding asal yang menunjukkan dua fase yang muncul secara bersamaan, yakni LD dan HD untuk $\alpha = \beta < 0.5$. Sedangkan, perubahan fase dari LD ke MC atau HD ke MC, merupakan perubahan fase yang kontinu. Hal ini disebabkan transisi fase dari LD ke MC maupun dari HD ke MC berlangsung secara halus (*smooth*) tanpa adanya perubahan yang tiba-tiba.

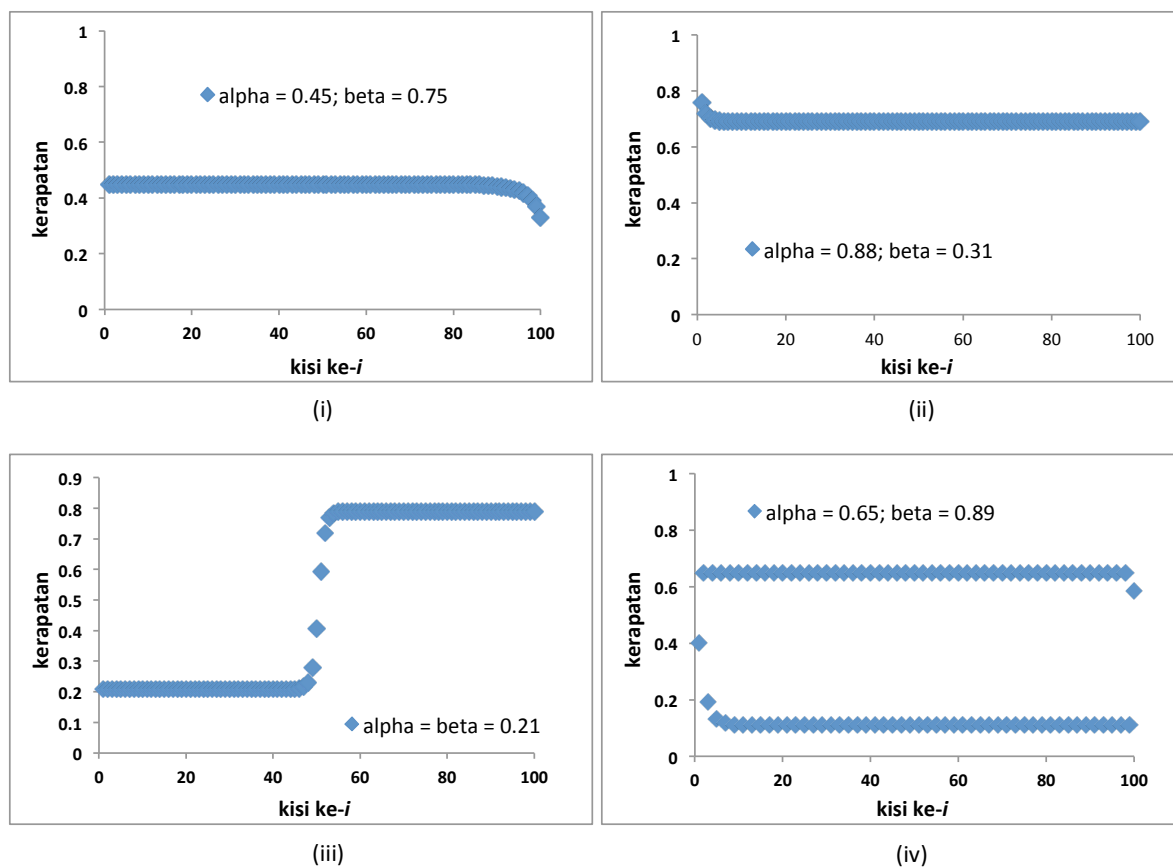


Gambar 6. Berbagai profil rapat arus untuk model TASEP dengan aturan dinamika *sequential updating* dan syarat batas terbuka.

Selain profile kerapatan dan diagram fase, dapat diperoleh pula berbagai profil rapat arus untuk model TASEP dengan aturan dinamika *sequential updating* dan syarat batas terbuka, sebagaimana

yang dapat diamati pada Gambar 6. Rapat arus menunjukkan rerata lompatan partikel dari satu kisi ke kisi lainnya. Dapat diamati pada Gambar 6(i)-(iv) bahwa rapat arus untuk berbagai fase kerapatan memiliki profil datar (*flat*) yang menunjukkan bahwa nilai rapat arus konstan untuk tiap-tiap kisi. Dari keempat grafik pada Gambar 6, rapat arus yang terbesar diperoleh untuk fase MC, yakni sebesar 0.25.

Berikut ini dijelaskan berbahasil hasil profil kerapatan dan rapat arus untuk model TASEP dengan aturan dinamika paralel *updating* dan syarat batas terbuka. Melalui aturan dinamika ini, setiap partikel yang kisi tetangga kanan terdekatnya kosong, akan melompat ke kisi tersebut pada tiap langkah waktu. Berbagai profil kerapatan untuk model TASEP ini dapat diamati pada Gambar 7.

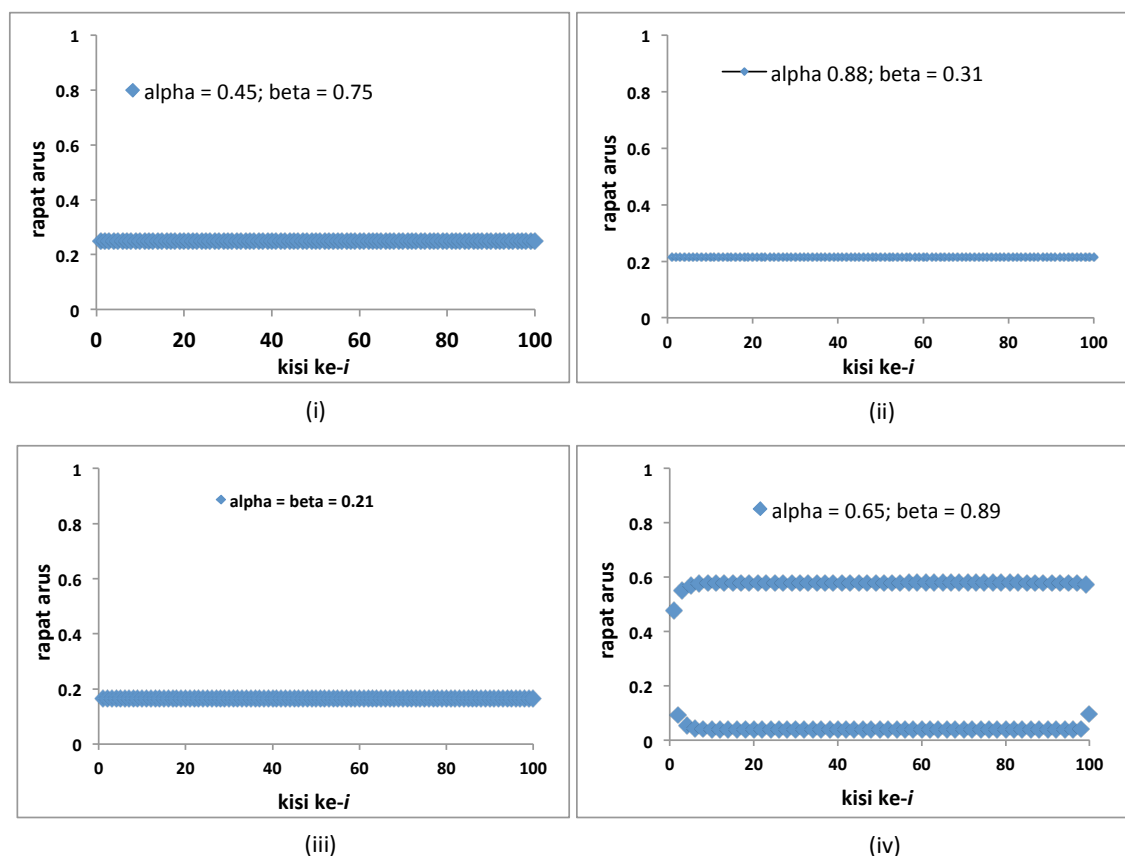


Gambar 7. Empat profil kerapatan untuk model TASEP dengan aturan dinamika paralel *updating* dan syarat batas terbuka.

Gambar 7(i) merupakan profil kerapatan untuk fase LD dengan $\alpha = 0.45$ dan $\beta = 0.75$. Dapat diamati bahwa profil kerapatannya datar (*flat*) dengan nilai sekitar $\rho = 0.45 < 0.5$, kecuali di daerah sekitar akhir kisi yang kerapatannya turun sedikit di bawah 0.45. Dapat diamati bahwa profil kerapatan LD untuk paralel *updating* ini tidak berbeda dengan profile kerapatan LD untuk sequential *updating*. Dengan demikian, fase LD untuk aturan dinamika paralel *updating* diperoleh juga dengan syarat $\alpha < \beta$ dan $\alpha < 0.5$. Gambar 7(ii) menunjukkan profil kerapatan HD dengan $\alpha = 0.88$ dan $\beta = 0.31$. Dapat diamati bahwa profil kerapatannya di sepanjang kekisi datar (*flat*) dengan nilai kerapatan *bulk* sekitar $\rho = 0.7 > 0.5$, kecuali di daerah sekitar awal kekisi yang nilai kerapatannya berada di atas nilai kerapatan *bulk*. Dapat dilihat pula bahwa profil kerapatan HD untuk paralel *updating* tidak berbeda dengan profil kerapatan HD untuk sequential *updating*. Sehingga, fase HD untuk aturan dinamika paralel *updating* diperoleh dengan syarat $\alpha > \beta$ dan $\beta < 0.5$. Gambar 7(iii) memberikan profil kerapatan untuk CP dengan $\alpha = \beta = 0.21$. Dapat diamati bahwa dari awal kekisi sampai sekitar pertengahan kekisi, profil kerapatannya datar dengan nilai $\rho = 0.21$, yang berupa kerapatan rendah. Sedangkan, di sekitar pertengahan kekisi terjadi perubahan secara tiba-tiba (*abrupt change*) dari kerapatan rendah ke kerapatan tinggi dengan nilai $\rho = 0.79$. Kerapatan tinggi ini bertahan dengan profil datar sampai akhir kekisi. Di bagian tengah kekisi terjadi kembali domain asal yang menandakan adanya transisi dari fase LD ke HD. Sebagaimana sebelumnya, hasil kerapatan CP untuk aturan dinamika paralel *updating* ini tidak berbeda dengan kerapatan CP untuk aturan dinamika sequential *updating*. Dengan demikian, fase CP untuk aturan dinamika paralel *updating* diperoleh jika $\alpha = \beta < 0.5$. Terakhir, Gambar 7(iv) menunjukkan profi kerapatan untuk fase MC dengan $\alpha = 0.65$ dan $\beta = 0.89$. Dapat dilihat bahwa profil kerapatan untuk fase MC dengan aturan dinamika paralel *updating* bergantian LD dan HD setiap kisinya. Jika kisi- i kerapatannya rendah, pada kisi sebelumnya, $i - 1$, atau kisi setelahnya, $i + 1$, kerapatannya tinggi, demikian seterusnya. Hal ini berbeda dengan profil kerapatan yang diperoleh untuk sequential *updating*, yang dominan datar (*flat*) dengan nilai sekitar 0.5. Perbedaan ini disebabkan oleh penerapan aturan dinamika yang berbeda. Untuk aturan dinamika *sequential* *updating*, lompatan partikel terjadi secara satu per satu tiap langkah waktu. Dengan demikian, untuk laju masukan dan laju keluaran yang sama-sama besar (di atas 0.5), partikel-partikel dapat menyesuaikan posisinya dengan baik. Namun demikian, hal ini tidak terjadi untuk aturan dinamika paralel *updating*. Untuk aturan dinamika yang terkahir ini, semua partikel yang menempati kisinya masing-masing, dan tetangga kanan terdekatnya kosong, akan bersama-

sama melompat ke tetangga kanan terdekatnya. Dengan demikian, untuk laju masukan dan laju keluaran yang tinggi (di atas 0.5) partikel tidak dapat mengatur dirinya ke dalam kisi-kisi secara merata sedemikian sehingga terdapat kisi yang padat (HD) dan ada pula kisi yang lengang (LD) berselang-seling. Ini menunjukkan bahwa pada aturan dinamika paralel *updating* partikel bersama-sama saling berlompatan dari satu kisi ke kisi yang lain secara serentak. Lebih jauh lagi, diagram fase untuk model TASEP dengan aturan dinamika paralel *updating* dan syarat batas terbuka menjadi sama dengan diagram fase untuk aturan dinamika *sequential updating* yang telah dijelaskan melalui Gambar 6.

Untuk rapat arus model TASEP dengan aturan dinamika paralel *updating* dan syarat batas terbuka dapat diamati pada Gambar 8.



Gambar 8. Berbagai profil rapat arus untuk model TASEP dengan aturan dinamika paralel *updating* dan syarat batas terbuka.

Dapat diamati secara umum dari keempat grafik pada Gambar 8 bahwa rapat arus untuk aturan dinamika paralel *updating* dan syarat batas terbuka bernilai tetap (konstan) sepanjang kisi. Gambar 8(i) menunjukkan rapat arus untuk fase LD untuk $\alpha = 0.45$; $\beta = 0.75$ yang bernilai konstan sebesar 0.248. Nilai rapat arus ini cukup besar mendekati nilai rapat arus maksimum untuk aturan dinamika sequential *updating* yakni 0.25. Hal ini masuk akal karena aturan dinamika paralel *updating* akan menghasilkan jumlah lompatan yang lebih banyak daripada aturan dinamika sequential *updating* sekalipun fasenya berada pada kerapatan rendah (LD). Dengan demikian, rapat arus untuk aturan dinamika paralel *updating* mestinya lebih besar karena jumlah lompatan partikelnya lebih banyak. Gambar 8(ii) menunjukkan rapat arus konstan sepanjang kisi sebesar 0.214 untuk fase HD dengan $\alpha = 0.88$; $\beta = 0.31$. Dapat diamati bahwa rapat arus ini justru lebih kecil daripada rapat arus pada aturan dinamika sequential *updating* pada fase yang sama. Bahkan nilai rapat arus ini lebih rendah daripada fase LD untuk aturan dinamika yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa untuk HD, peluang melompat partikel kecil karena sebagian besar kisi sudah terisi partikel. Jumlah lompatan yang sedikit menyebabkan rapat arusnya kecil. Gambar 8(iii) menunjukkan nilai rapat arus yang konstan sepanjang kisi sebesar 0.166 untuk CP. Dapat diamati bahwa nilai ini lebih rendah daripada nilai rapat arus dengan aturan dinamika sequential *updating* pada fase yang sama. Akhirnya, Gambar 8(iv) menampilkan rapat arus untuk fase MC dengan $\alpha = 0.65$; $\beta = 0.89$. Profil rapat arus ini berbeda dengan profil rapat arus dengan aturan dinamika sequential *updating*. Profil rapat arus untuk fase MC dengan aturan paralel *updating* mengikuti profil kerapatannya, yakni ada kekisi dengan rapat arus tinggi, mencapai 0.578, dan ada kekisi dengan rapat arus rendah, mencapai 0.038. Profil rapat arus tinggi dan rendah ini juga terjadi secara bergantian sepanjang kekisi. Hal ini menunjukkan bahwa ada kisi-kisi yang peluang melompatnya besar, ada pula yang tidak ada partikel dalam kisi tersebut sehingga tidak ada peluang melompat. Lebih jauh lagi, hal ini menunjukkan pula bahwa untuk fase MC dengan aturan dinamika paralel *updating*, sepanjang waktunya, terjadi susunan kisi yang terisi partikel dan kosong secara bergantian. Partikel-partikel secara bersamaan melompat ke kisi yang kosong, dan meninggalkan kekosongan pada kisi yang sebelumnya ditempati, selanjutnya kisi yang kosong tersebut diisi secara bersamaan oleh partikel lain, demikian seterusnya. Partikel tidak dapat lagi menyesuaikan diri secara individual (untuk mengisi kekisi kosong) karena besarnya laju masukan dan laju keluaran.

Dengan demikian, jika dibandingkan antara model TASEP dengan aturan dinamika paralel dan sequential *updating*, terjadi perbedaan hanya pada kerapatan dan rapat arus fase MC. Diagram fase antara kedua aturan dinamika nampak sama. Kedua aturan dinamika ini dapat diterapkan untuk memodelkan lalu lintas pada jalan searah. Dalam lalu lintas jalan searah, kendaraan dapat memenuhi aturan dinamika sequential dan paralel *updating*. Kendaraan dapat saja menyesuaikan secara individual sesuai dengan aturan dinamika sequential updating. Namun ada pula arus lalu lintas dimana jika jalan di depannya kosong, maka kendaraan secara serentak akan memenuhi jalan yang kosong tadi, sesuai dengan aturan dinamika paralel *updating*. Dengan menggunakan kedua aturan dinamika ini, dan juga syarat batas terbuka, dapat diperoleh berbagai fase kepadatan lalu lintas kendaraan, yakni lalu lintas dengan i) kepadatan rendah, ii) kepadatan tinggi, iii) kepadatan rendah dan tinggi (sekaligus), dan iv) arus maksimal. Sesuai dengan syarat batas terbuka, kepadatan yang rendah pada jalan searah diperoleh saat tidak banyak kendaraan yang masuk (melewati) jalan searah tersebut. Hal ini ditandai oleh laju masukan kendaraan yang lebih kecil daripada laju keluar kendaraan dari jalan tersebut. Namun demikian, kepadatan rendah diperoleh jika laju masukan kendaraan tidak lebih besar daripada 0.5. Jika laju masuk kendaraan lebih besar daripada 0.5, maka lalu lintas pada jalan searah tersebut menjadi padat namun lancar. Setiap kendaraan dapat bergerak walaupun jalan padat (tidak terjadi kemacetan). Jalan searah akan berkepadatan tinggi jika laju keluar kendaraan lebih rendah daripada laju masuknya, dan laju keluar kendaraan masih di bawah 0.5. Inilah yang dapat mengakibatkan kemacetan di jalan searah tersebut. Laju masuk kendaraan yang lebih besar daripada laju keluar dapat disebabkan oleh bertambahnya kendaraan yang melalui jalan searah tersebut. Namun demikian, karena tidak adanya pengaturan lalu lintas yang menyesuaikan dengan bertambahnya kendaraan, maka akibatnya laju masuk kendaraan lebih dari laju keluar, dan laju keluar tetap. Solusi dari keadaan ini adalah perlu diusahakan untuk meninggikan laju keluar sehingga fase kepadatannya menjadi fase arus maksimum (MC). Hal ini dilakukan dengan meningkatkan laju keluaran di atas 0.5, sehingga kepadatan menjadi padat-lancar.

Campur tangan oleh yang berkepentingan (misalnya polisi) dalam hal ini sangat penting. Jika awalnya jalan berada pada kepadatan rendah, kemudian banyak kendaraan yang masuk ke jalan tersebut dengan kondisi yang tetap sama, maka dimungkinkan terjadi kemacetan. Agar tidak terjadi kemacetan, caranya tidak dapat dengan mengubah situasi jalan searah menjadi kepadatan

rendah, tetapi membuat jalan tersebut padat-lancar, yakni melalui fase arus maksimal. Oleh karena itu, polisi sangat berperan menjadikan jalan tersebut padat-lancar, dengan memberikan kesempatan berjalan (bergerak) yang lebih (lama) untuk jalan yang mengalami kepadatan tinggi. Paling tidak, diusahakan dulu agar jalan tersebut padat, tapi lancar.

Diagram fase untuk model TASEP dengan syarat batas terbuka juga dapat memberikan beberapa petunjuk tentang lalu lintas kendaraan di jalan searah. Petunjuk ini berupa berbagai perubahan fase kepadatan lalu lintas di jalan searah dan alternatif solusi untuk mengurangi kemacetan di jalan searah. Jika kepadatan tinggi (HD) di bagian bawah kanan diagram fase adalah penyebab kemacetan, maka fase inilah yang perlu dihindari. Sedangkan, fase yang lain yaitu LD, CP, dan MC adalah kepadatan arus lalu lintas searah yang diinginkan. Seandainya jalan searah tersebut dimulai dari lalu lintas yang kepadatannya rendah (LD), dengan laju masuk kendaraan masih lebih kecil dibandingkan dengan laju keluar kendaraan dan laju masuk dan laju keluar lebih kecil daripada 0.5. Selanjutnya, disebabkan oleh alasan teknis tertentu, misalnya terjadi kecelakaan atau ada perbaikan jalan, laju keluar kendaraan berkurang, maka lalu lintas kendaraan tersebut akan berada pada CP dimana terdapat bagian lalu lintas tertentu yang kepadatannya rendah dan bagian lainnya berkepadatan tinggi. Jika laju keluar kendaraan terus berkurang, maka mulailah terjadi kepadatan tinggi (HD). Selama laju masuk dan keluar kendaraan masih berada di bawah 0.5, maka cara mengatasi kepadatan tinggi ini adalah dengan memperbesar laju keluar kendaraan, misalnya dengan mengatasi kecelakaan tersebut atau menghentikan sementara perbaikan jalan sehingga laju keluar kendaraan dapat bertambah. Hal ini dapat menyebabkan lalu lintas kendaraan kembali berada pada CP dan kemudian kepadatan rendah. Ini adalah salah satu contoh dimana TASEP dapat digunakan untuk memodelkan lalu lintas kendaraan di jalan searah. Tentu terdapat kasus lainnya dimana model ini dapat juga diimplementasikan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah diuraikan di atas, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- i. Telah dilakukan pemodelan lalu lintas kendaraan pada jalan searah menggunakan TASEP dengan syarat batas terbuka, dan aturan dinamika *sequential* serta *parallel updatings*. Dalam hal ini, kendaraan dapat dianalogikan sebagai partikel yang berinteraksi secara inti keras (*hard core particles*), sedangkan jalan searah dapat dianalogikan sebagai kekisi yang diskrit.
- ii. Telah ditentukan dan dikaji berbagai profil kerapatan dan rapat arus partikel yang diperoleh dari model TASEP, baik menggunakan analisis teoretik maupun numerik. Secara umum, diperoleh empat profil kerapatan model TASEP dengan aturan dinamika *sequential* maupun *parallel updating*, yakni kerapatan rendah (LD), kerapatan tinggi (HD), fase koeksistensi (CP), dan arus maksimal (MC). Profil kerapatan yang diperoleh dari kedua aturan dinamika ini nampak tidak berbeda kecuali untuk profil kerapatan MC. Hal ini disebabkan pada aturan dinamika *sequential updating*, partikel-partikel dapat mengatur dirinya sehingga diperoleh profil kerapatan yang flat di sekitar 0.5. Sedangkan untuk aturan dinamika *parallel updating*, partikel tidak memiliki waktu untuk mengisi kekisi sehingga terjadi profil kerapatan LD dan HD yang saling bergantian sepanjang kekisi. Lebih jauh lagi, dapat diperoleh pula diagram fase yang sama antara model TASEP dengan aturan dinamika *sequential* dan *parallel updatings*.
- iii. Telah dilakukan interpretasi hasil dari tujuan ii) untuk kepadatan dan arus lalu lintas kendaraan pada jalan searah. Interpretasi ini telah dijelaskan dengan cukup mendetail pada pembahasan di atas.

B. Saran

Berbagai saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah

- i. Penelitian tentang model TASEP ini belum dilakukan secara menyeluruh. Syarat batas yang telah dibahas dalam laporan ini baru sampai pada syarat batas terbuka. Syarat batas tertutup

belum diteliti dan dibahas secara mendetail. Padahal syarat batas periodik ini juga menarik untuk dapat diteliti lebih lanjut.

- ii. Penelitian yang dilakukan berdasarkan analisis teoritis dan numerik. Analisis simulasinya belum terlihat. Simulasi model TASEP sangat penting dilakukan untuk memberikan perbandingan terhadap analisis teoretik dan numeriknya. Oleh karena itu, analisis simulasi perlu dilakukan pada penelitian-penelitian ke depan.
- iii. Penelitian ini masih dibatasi untuk kendaraan di jalan yang searah. Kelemahan dari model yang dipelajari ini adalah tidak dimungkinkannya kendaraan saling melewati (menyalip). Padahal dalam kenyataannya, pada jalan searahnya pun, terjadi proses saling melewati ini. Hal ini dapat di atas dengan menambahkan kekisi sehingga sistem kekisi menjadi dua dimensi. Dengan demikian, dapat dimodelkan mekanisme lalu lintas di jalan searah yang mana kendaraan dapat saling melewati. Model ini juga sangat menarik untuk dipelajari lebih lanjut pada penelitian berikutnya.
- iv. Terakhir adalah ukuran dari kendaraan itu sendiri. Dalam kenyataannya, ukuran kendaraan dapat berbeda-beda. Dalam penelitian ini, ukuran kendaraan dianggap sama dengan ukuran partikel yang sama (*site exclusion only*). Oleh karena itu, pada penelitian mendatang dapat dikaji model TASEP dengan ukuran kendaraan yang berbeda-beda dengan memberikan potensial inti keras yang berbeda pada partikel-partikel dalam kisi.

BAB VI

PENUTUP

Demikianlah laporan penelitian ini dibuat. Semoga laporan penelitian ini dapat digunakan sebagaimana mestinya sebagai salah satu referensi tentang pemodelan lalu lintas kendaraan di jalan searah. Penelitian ini dapat memberikan berbagai manfaat yang penting dalam mengatasi berbagai permasalahan tentang kepadatan lalu lintas kendaraan di Indonesia, umumnya, dan di Yogyakarta khususnya.

REFERENSI

1. Motorcycles Dominate Traffic on Yogyakarta – Purworejo Route, http://www.newsterupdate.com/2010_09_08_archive.html, diunduh tanggal: 05 Mei 2013.
2. C. McDonald, J. Gibbs, dan A. Pipkin, *Biopolymers* **6**, 1 (1968).
3. A. Pipkin dan J. Gibbs, *Biopolymers* **4**, 3 (1966).
4. A. Permezziani, T. Franosch, dan E. Frey, *Phys. Rev. E* **70**, 046101 (2004).
5. E. Frey, A. Permezziani, dan T. Franosch, *Genome Informatics* **15**, 46 (2004).
6. S. Srinivasa dan M. Haenggi, The TASEP: A Statistical Mechanics Tool to Study the Performance of Wireless Line Networks, in *Proceedings of 19th IEEE International Conference on Computer Communications and Network (ICCN 2010)*, Zurich, Switzerland, 2010.
7. D. Chowdhury, A. Schadschneider, dan K. Nishinari, *Phys. Life Rev.* **2**, 319 (2005).
8. B. Derrida dan M. R. Evans, *The Asymmetric Exclusion Model: Exact Results Through a Matrix Approach (Nonequilibrium Statistical Mechanics in One Dimension)*, Chapter V, pp. 277 – 302, Cambridge University Press, 1997.
9. W. S. B. Dwandaru, *Theory of Dynamics in Driven Lattice Fluids*, Master's Thesis, Bristol University, Bristol, 2006.
10. B. Derrida, E. Domany, dan D. Mukamel, *J. Stat. Phys.* **69**, 667 (1992).
11. J.-P. Hansen dan I. R. MacDonald, *Theory of Simple Liquids*, 3rd Edition, Academic Press (Elsevier), 2006.
12. D. Chowdhury dan D. Stauffer, *Principles of Equilibrium Statistical Mechanics*, Wiley-VCH, 2000.
13. B. J. Alder dan T. E. Wainwright, *J. Chem. Phys.* **31**, 459, (1959).
14. J.-P. Hansen, *Phys. Rev. A* **8**, 3096 (1973).
15. W. A. Curtin dan N. W. Aschroft, *Phys. Rev. A* **32**, 2909 (1985).
16. M. N. Rosenbluth dan A. Rosenbluth, *J. Chem. Phys.* **22**, 881 (1954).
17. W. W. Wood dan J. D. Jacobson, *J. Chem. Phys.* **27**, 1207 (1957).
18. B. J. Alder dan T. E. Wainwright, *J. Chem. Phys.* **27**, 1208 (1957).
19. R. J. Baxter, *J. Chem. Phys.* **49**, 2770 (1968).
20. A. A. Brian, H. L. Frisch, dan L. S. Lerman, *Biopolymers* **20**, 1305 (1981).
21. H. C. Longuet-Higgins dan B. Widom, *Molecular Physics* **8**, 549 (1964).
22. B. Derrida, E. Domany, dan D. Mukamel, *J. Stat. Phys.* **69**, 667 (1992).

23. J. G. Brankov, V. V. Papoyan, V. S. Poghosyan, dan V. B. Priez-Zhev, *Physica A* **368**, 471 (2006).

24. H. Hirsch dan E. Frey, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 095701 (2006).