PENGEMBANGAN SISTEM *MULTIAGENT* PADA *WIRELESS SENSOR NETWORK*

Seno Adi Putra
Program Studi S1 Sistem Informasi Telkom University
Jln Telekomunikasi No. 1 Terusan Buah Batu Bandung 40257
e-mail. adiputra@telkomniversity.ac.id

Abstrak

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan perangkat embedded kecil yang dipasang di jaringan skala besar yang memiliki kapabilitas penginderaan, komputasi, dan komunikasi. WSN mengkombinasikan teknologi sensor modern, teknologi micro electronic, komputasi, teknologi komunikasi, dan pemrosesan terdistribusi. Implementasi sistem multiagent pada WSN cukup menjanjikan untuk meningkatkan efektifitas dan efisiensi kerja WSN. Namun, penelitian yang dilakukan terkait sistem multiagent di WSN masih parsial dengan kata lain terlalu fokus pada isu-isu tertentu. Paper ini mendeskripsikan penelitian terkait dengan penerapan sistem multiagent di WSN yang memperhatikan berbagai aspek pendukung untuk efektifitas dan efisiensi agent seperti arsitektur organisasi multiagent, itinerary planning, kapabilitas agent, middleware dan platform hardware yang digunakan. Metodologi yang digunakan adalah INGENIAS yang berbasis pada agent-oriented software engineering.

Kata kunci

Wireless Sensor Network, agent, multiagent, itinerary planning, INGENIAS.

1. PENDAHULUAN

Saat ini perkembangan teknologi *sensor* semakin pesat dengan kapabilitas tidak hanya pada aspek pengindraan dan *signal acquisition*, namun memiliki kapabilitas dalam melakukan komputasi dan komunikasi dengan perangkat lainnya. *Sensor* ini dinamakan sebagai *Wireless Sensor Network* (WSN) yang juga memanfaatkan teknologi internet sebagai media komunikasinya.

WSN memiliki beberapa karakteristik seperti alokasi energi dan *bandwidth* terbatas, *unattended ad hoc deployment*, cakupan skala luas, *high noise* dan *fault rate*, lingkungan yang dinamis dan tak menentu, serta memberikan dampak pada pengembangan aplikasi yang variatif seperti *structural monitoring*, *bio-habitat monitoring*, *industrial monitoring*, *disaster management*, *military surveillence*, dan *building security*. Karakteristik ini memberikan tantangan bagi pengembangan WSN.

Saat ini WSN di-*deploy* dengan pendekatan *client-server*. Menurut [1] pendekatan ini merupakan metode tradisional penyebaran data di WSN. Kemunculan *event* me-*trigger node-node* sumber di sekitarnya untuk mengumpulkan dan mengirim data ke *sink* sendiri-sendiri. Jumlah aliran data umumnya sama dengan jumlah *node-node* sumber sehingga menyebabkan konsumsi *bandwidth* dan energi yang cukup tinggi. Pendekatan ini menyebabkan ketidakseimbangan konsumsi energi di jaringan karena *node-node* yang lebih dekat dengan *sink* akan mengirim lebih banyak data, yaitu data miliknya maupun data yang dititipkan dari *node* lain. Untuk itu, diperlukan pendekatan lain yang dapat menyelesaikan permasalahan di atas, yaitu salah satunya dengan pendekatan sistem *mobile agent*.

Menurut [1] pendekatan berbasis *mobile agent* merupakan alternatif pendekatan arsitektur di WSN. *Sink node* mengirimkan *mobile agent* ke area target untuk mengunjungi *node* satu per satu, lalu data-data *sensor* dikurangi dan dikumpulkan oleh *agent*, dan selanjutnya sesuai dengan instruksi *mobile agent*, data-data tersebut dikirim kembali ke *sink*. Pendekatan ini menghasilkan satu aliran lalu lintas data daripada banyak aliran lalu lintas data.

Pendekatan *mobile agent* memerlukan perencanaan dan perancangan arsitektur yang baik untuk menjamin efektifitas dan efisiensi kinerja dari agent-agent yang terlibat di dalamnya. Untuk itu, diperlukan berbagai macam pertimbangan dalam melakukan perencanaan dan perancangan *mobile agent* tersebut terutama pertimbangan terkait dengan konsep sistem *multiagent*. Menurut [6] ada beberapa aspek yang perlu dipertimbangkan dalam merancang WSN dengan pendekatan *mobile agent*, yaitu aspek arsitektur, *itinerary planning*, perancangan *middleware*, dan aspek *hardware*.

Paper ini menjelaskan *pre-liminary design* tentang implementasi sistem *multiagent* di WSN. Paper ini dibagi ke dalam sub bab : (1) Pendahuluan, (2) Konsep Dasar Sistem *Multiagent*, (3) Metodologi, (4) Analisis *Framework* Pengembangan Sistem *Multiagent*, (5) Rancangan Awal Sistem *Multiagent* di WSN, (6) Kesimpulan.

2. KONSEP DASAR SISTEM *MULTIAGENT*

Menurut [8], *agent* adalah sistem komputer yang memiliki kapabilitas melakukan aksi yang otonom di lingkungan tertentu untuk mencapai tujuan yang didelegasikan kepadanya. *Agent* yang *intelligent* memiliki perilaku reaktif, proaktif, dan sosial. Sistem reaktif adalah sistem yang memelihara interaksi yang sedang berjalan dengan lingkungannya dan memberikan respon terhadap perubahan yang terjadi. Proaktif (*goal directed behaviour*) berarti *agent* menghasilkan dan berusaha untuk mencapai *goal*, tidak hanya didorong oleh *event*, namun punya inisiatif dan mengenali *opportunity*. Kemampuan sosial adalah kemampuan untuk berinteraksi dengan *agent* lain (dapat juga manusia) melalui *kerja sama*, *koordinasi*, dan *negosiasi* atau istilah umumnya adalah kemampuan untuk berkomunikasi. Properti-properti *agent* lainnya adalah *mobility*, *veracity* (ketelitian), *benevolence* (dapat bekerja sama), *rationality*, dan *learning*/*Adaption*.

Sejalan dengan sistem komputer yang semakin komplek, diperlukan abstraksi dan metafora yang lebih *powerful* untuk menjelaskan operasi sistem komputer. Penjelasan *low level* menjadi tidak praktis sehingga dihasilkan istilah baru bernama *Intentionalstance* yang merupakan salah satu bentuk abstraksi itu [8]. *Intentional notion* adalah bentuk *tool* abstraksi yang memberikan kenyamanan dan cara yang familiar untuk mendeskripsikan, menjelaskan, dan memprediksi perliku sistem komplek. Daniel Dennett [8] mendefinisikan istilah *intentional system* sebagai entitas-entitas yang perilakunya dapat diidentifikasi oleh metode pengatributan *belief*, *desire*, dan *rational acumen.* Menurutnya *agent*, sebagai *intentional system*, merepresentasikan abstraksi *powerful* lebih lanjut.

Pada [9] dideskripsikan arsitektur *Belief*, *Desire*, *Intention* (BDI) sebagai arsitektur *agent* yang populer. Salah satu arsitektur BDI yang terkenal adalah *Procedural Reasoning System* (PRS). Pada sistem PRS, *belief* merepresentasikan informasi yang dimiliki *agent* terkait dengan lingkungannya, *desire* merepresentasikan tugas-tugas yang diberikan kepada *agent* sesuai dengan obyektif atau tujuan yang harus dicapainya, *intention* merepresentasikan *desire* yang *agent* komitmen lakukan, dan *plan* menentukan beberapa daftar aksi-aksi yang dapat dilakukan *agent* untuk mendukung *intention*-nya. Empat struktur data ini dikelola oleh intrepeter *agent* yang bertanggung jawab dalam memperbaharui *belief* dari hasil observasi lingkungan, menghasilkan *desire* baru sebagai dasar *belief* baru, dan memilih beberapa set pekerjaan yang harus dilakukan sebagai *intention*-nya. Selanjutnya intrepeter memilih aksi yang harus dilakukan. *Agent* yang memiliki karakteristik ini selanjutnya berinteraksi dengan *agent-agent* lain membentuk sistem *multiagent*.

Sistem *Multiagent*, menurut [8], adalah sistem yang terdiri dari *agent-agent* yang berinteraksi satu sama lain untuk melakukan kerja sama, koordinasi, dan negosiasi. Kerja sama adalah bekerja secara bersama-sama untuk meraih *goal* bersama, biasanya didorong oleh pernyataan bahwa "*Tidak ada satu agent yang bisa mencapai goalnya sendirian*" atau "*Kerja sama akan menghasilkan hasil yang lebih baik (misalnya, proses berjalan cepat)*". Koordinasi adalah mengelola ketergantungan antar aktifitas, sebagai contoh, jika *agent* ingin menggunakan *resource* yang tidak di-*share*, maka perlu dilakukan koordinasi. Beberapa alasan *agent* perlu koordinasi adalah : (1) *goal* dari *agent-agent* dapat menyebabkan konflik di antara aksi-aksinya, (2) dalam mencapai tujuan, *agent* dapat saling ketergantungan antar satu *agent* dengan *agent* lainnya, (3) *agent* memiliki kapabilitas dan pengetahuan berbeda, (4) tujuan *agent* dapat tercapai dengan cepat jika *agent* berbeda pekerjaan dan kapabilitas bekerja sama secara terkoordinir. Negosiasi adalah kemampuan untuk mencapai persetujuan terkait dengan kepentingan umum, biasanya melibatkan *offer* dan *counter-offer,* dengan kompromi yang dibuat oleh partisipan-partisipan.

Teknik koordinasi untuk alokasi pekerjaan dan sumber daya antar *agent* dan penentuan struktur organisasi adalah protokol *contact net* [9]. Pendekatan ini berdasarkan struktur terdesentralisasi di mana *agent-agent* berperan dalam dua peran, yaitu manajer dan kontraktor. Dasar pemikiran dari bentuk koordinasi ini adalah jika sebuah *agent* tidak dapat menyelesaikan masalah yang diberikan kepadanya dengan memanfaatkan sumber daya lokalnya, maka dilakukan dekomposisi masalah ke dalam sub-masalah dan mencoba mencari *agent* lain yang dapat menyelesaikan sub masalah tersebut. Secara umum penyelesaian sub masalah ini terdiri dari tiga tahap, yaitu (1) pengumuman kontrak oleh *agent* manajer, (2) pengiriman penawaran oleh *agent* kontraktor sebagai respon pengumuman kontrak, dan (3) evaluasi penawaran yang telah dikirim oleh kontraktor dan menentukan *agent* kontraktor yang akan dipercaya.

3. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam perancangan model sistem *multiagent* di WSN adalah INGENIAS. Metodologi ini berbasis pada *agent-oriented software engineering* (AOSE). Menurut [14], INGENIAS melingkupi siklus pengembangan mulai dari analisis sampai ke pengkodean dengan menerapkan pendekatan *model-driven engineering* (MDE). Metodologi ini mendefinisikan bahasa pemodelan spesifik, proses-proses software, dan dukungan *tool*.

Sistem *multiagent* dan INGENIAS adalah organisasi *agent* yang merupakan entitas intensional dan sosial. Agent mengunakan aplikasi yang merepresentasikan lingkungan dan fasilitas-fasilitas sistem. Model yang menentukan spesifikasi sistem *multiagent* ini mendeskripsikan lingkungan, *agent-agent* dan interaksinya baik dari persfektif diagram statik maupun dinamik. Bahasa pemodelan juga mencakup mekanisme ekstensi sederhana bagi *agent* melalui relasi *inheritance*. *Tool* yang dapat digunakan untuk metodologi ini menurut [14] adalah INGENIAS *Development Kit* (IDK).

Tahapan-tahapan pengembangan sistem *multiagent* di WSN menurut [14] adalah sebagai berikut:

(1) identifikasi *container* dan sumber daya. Pada tahapan ini dilakukan identifikasi perangkat komputasi yang dapat mengeksekusi kode dan mentransmisikan informasi. Perangkat ini berupa sensor beserta perangkat-perangkat tambahan seperti komputer atau fasilitas komunikasi;

(2) identifikasi data yang akan dihasilkan dan menentukan *agent-agent* yang berperan dalam mengorganisir pemrosesan dan integrasi data yang rumit. Proses ini akan terus berulang jika masih ada data yang harus diidentifikasi;

(3) menentukan spesifikasi *agent* yang mengelola adaptasi dinamis jaringan sensor. Tahapan ini mengidentifikasi elemen-elemen seperti sumber daya, peran-peran, dan aktor-aktor yang memungkinkan terjadinya kegagalan atau perlu di-*setup* atau di-*deploy* ulang selama jaringan sensor itu bekerja sehingga dapat ditentukan mekanisme pencarian, evaluasi, dan pergantian elemen-elemen tersebut. Tahapan ini juga merancang *agent* spesifik terkait mekanisme pergantian tersebut yang di dalamnya mencakup *agent* pengawas yang memonitor elemen-elemen tersebut. Proses ini berulang jika masih perlu dikaji sumber daya-sumber daya yang *replaceable*; dan

(4) tahap selanjutnya merupakan aktifitas INGENIAS yang tahapan-tahapannya dilakukan secara paralel mulai dari menentukan *Platform Independence Module* (PIM) yang mendeskripsikan perangkat, *agent-agent* dan perananannya, informasi yang dipertukarkan, dan interaksinya tanpa mengkaji secara rinci *platform* yang digunakan. Selanjutnya mengembangkan model yang diperlukan untuk *Platform Spesifik Module* (PSM) dan pengembangan transformasi yang mendukung penyempurnaan PIM dan PSM yang sudah dimodelkan;

(5) Langkah terakhir adalah membangkitkan kode program dari PSM.

4. ANALISIS FRAMEWORK PENGEMBANGAN SISTEM MULTIAGENT DI WSN

Saat ini bahasa komunikasi *agent* yang banyak digunakan dan dipelajari adalah *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA) *Agent Communication Language* (ACL). Menurut [9], saat ini FIPA dikembangkan sebagai standar aktifitas IEEE, bernama FIPA-IEEE. Beberapa fitur pada agent seperti interoperabilitas *web service*, komunikasi manusia-*agent*, *mobile agent*, dan *peer-to-peer agent* juga dikembangkan.

Java Agent Development Environtment (JADE), menurut [9], merupakan *agent platform* yang mengikuti standar FIPA. JADE menerapkan spesifikasi manajemen *agent* secara lengkap sebagaimana di definisikan oleh FIPA seperti *Agent management System* (AMS), *Directory Facilitator* (DF), *Message Transport Service* (MTS), *Agent Communication Channel* (ACC). JADE juga menerapkan FIPA *Agent Communication Stack* mulai dari FIPA ACL untuk struktur pesannya, FIPA SL untuk ekspresi konten pesan, ditambah dukungan untuk interaksi FIPA dan protokol transport. JADE juga mendefinisikan komponen-komponen di luar yang didefinisikan FIPA seperti terdistribusi, *fault tolerant*, arsitektur kontainer, arsitektur *service* internal, *persistent message delivery*, *semantic framework*, mekanisme keamanan, mobilitas *agent*, interaksi *web service*, dan antarmuka grafis.

Beberapa *agent framework* telah dikembangkan untuk lingkungan *desktop*. Seiring dengan perkembangan teknologi *mobile phone*, banyak pengembangan *framework* serupa untuk diterapkan di lingkungan yang serba memiliki keterbatasan misalnya Java ME CLDC. Menurut[10], saat ini *agent framework* dibagi ke dalam dua kategori, yaitu untuk lingkungan desktop dan lingkungan CLDC. Salah satu lingkungan CLDC yang cukup terkenal adalah *Agent Factory Micro Edition* (AFME). Contoh *framework* yang serupa adalah JADE LEAP, 3APL-M, SAGE LITE, dan CourgaarME. JADE LEAP, CougaarME, MicroFIPA-OS, dan SAGE Lite merupakan *framework* pengembangan teknologi *agent*, namun berbeda dengan AFME, *framework* tersebut tidak *reflective* (kemampuan melakukan penalaran tentang dirinya) dan tidak menggunakan bahasa pemrograman abstrak yang berbasis pada teori *agent* rasional. 3APL-M dengan AFME memiliki kesamaan di mana keduanya memiliki kapabilitas penalaran, namun 3APL-M tidak memiliki komponen jaringan sedangkan AFME memiliki komponen tersebut melalui *message transport service*. Ukuran kode program AFME relatif kecil dibandingkan dengan *framework* lainnya di mana infrastruktur intinya berukuran hanya 77 Kb. Menurut eksperimen yang dideskripsikan [10], diperoleh bahwa AFME waktu eksekusinya lebih cepat daripada 3APL-M, namun demikian 3APL-M memiliki fitur-fitur yang tidak didukung AFME, yaitu 3 APL-M menggabungkan *prolog engine* di dalamnya.

5. RANCANGAN AWAL SISTEM MULTIAGENT DI WIRELESS SENSOR NETWORK

Dalam merancang sistem *multiagent* langkah pertama yang dilakukan adalah penentuan aturan (*rule*) dan kebijakan (*policy*) yang diterapkan di lingkungan sistem. Untuk itu diperlukan konsep organisasi *agent-agent*, *setup* arsitektur sistem *multiagent* di WSN, identifikasi *agant-agent* yang terlibat dalam organisasi, pendefinisian kapabilitas *agent* dalam organisasi, dan penentuan platform *middleware* dan *hardware*.

Konsep Organisasi Multiagent

Menurut [11], organisasi dipertimbangkan sebagai entitas pertama yang mengajukan *goal* dan tidak bisa berdiri sendiri karena bergantung pada set *agent-agent* yang melakukan pekerjaan untuk mencapai goal organisasi. Selanjutnya internal organisasi diperinci dengan *goal*, *workflow*, struktur grup, dan sumber daya.

Perlu diangkat karakteristik agent-agent yang sifatnya otonom dengan kata lain agent-agent tidak selalu mengeksekusi pekerjaan yang diminta organisasi. *Agent* juga bersifat adaptif dan punya potensi untuk mengubah perilakunya sehingga sebuah organisasi harus memperhatikan bahwa agent-agent yang mau diajak kompromi di masa lalu belum tentu dapat berkompromi di masa yang akan datang.

Organisasi membutuhkan agent-agent untuk mengeksekusi pekerjaan-pekerjaan dan memproduksi suatu hasil yang diinginkan. Di lingkungan terbuka organisasi dapat saja menemukan *agent-agent* yang mampu melakukan pekerjaan yang sama. Kualitas hasil pekerjaan *agent* bergantung pada beberapa variabel seperti waktu CPU atau ketersediaan memori. Selain itu, *agent* dapat muncul atau hilang beberapa saat selama waktu hidup organisasi sehingga organisasi harus menyimpan jejak rekam *agent-agent* yang selanjutnya organisasi dapat secara efektif melakukan kerja sama dengannya.

Untuk menentukan kinerja *agent*, didefinisikan dua parameter pengukuran agent, yaitu *trust* dan *effectivity*[11]. *Trust* direpresentasikan sebagi riwayat aktivitas *agent* dan fungsi utilitas, yaitu sejauhmana *agent* melakukan tugasnya dengan baik. Fungsi utilitas menghasilkan sebuah estimasi *trust* yang memberi penghargaan kepada sebuah *agent* berdasarkan riwayat kinerjanya di masa lalu. Riwayat ini terdiri dari apakah *agent* memenuhi kompromi-kompromi dengan organisasi atau sebaliknya. *effectivity* direpresentasikan sebagai nilai dari pekerjaan yang telah dilakukan, kualitas hasil pekerjaan, dan kondisi-kondisi eksekusi. Kualitas perlu dihitung dengan fungsi utilitas lain dengan mendefinisikan organisasi yang mempertimbangkan parameter-parameter terkait dengan *goal*-nya.

Menurut [11] untuk mencapai organisasi yang sehat perlu didefinisikan fungsi manajemen untuk menambah, menghapus, dan memonitor *agent* di organisasi. *Agent-agent* yang diterima di komunitas harus menyediakan informasi yang baik ke *agent-agent* lain sesuai yang diminta. Tingkat kualitas informasi diukur dengan skema *voting* dengan memeprtimbangkan dokumen-dokumen terkait *agent* yang sebelumnya diketahui. Anggota organisasi membantu mendeteksi *agent-agent* yang tidak mampu bekerja sama. Prinsip dari mekanisme ini adalah "*Semua berjalan baik jika sebagian besar anggota berfikir semua juga baik*". Melalui mekanisme ini dihasilkan biaya komputasi rendah.

Untuk mencapai *goal*-nya organisasi harus menjamin bahwa: (1) tidak ada anggota yang tidak berkolaborasi ketika diminta, (2) tidak ada anggota dengan produktifitas rendah, (3) anggota tidak boleh salah menggunakan sumber daya organisasi sehingga mencegah *agent* lain melakukan tugasnya, dan (4) *agent-agent* yang suka konflik dikeluarkan dan tidak pernah diterima lagi.

Konsep lain yang perlu dipertimbangkan dalam merancang *agent* adalah *workflow* yang meliputi cara *agent* melakukan

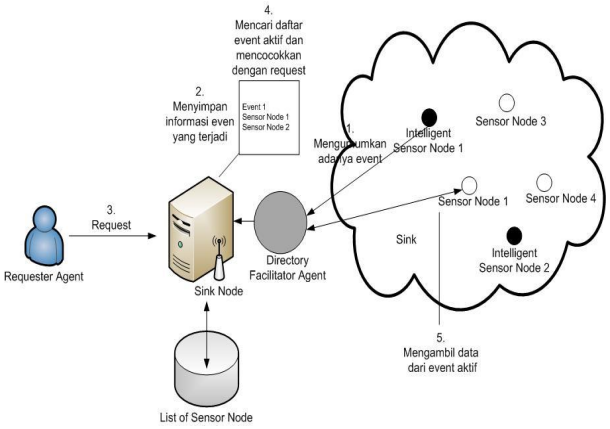
registasi ke organisasi, cara melakukan pemutusan hubungan kerja organisasi dengan *agent*, dan cara memonitor organisai [11]. Pada proses registrasi ke organisasi, penerimaan anggota baru ke organisasi ditentukan dua faktor: (1) faktor kebutuhan organisasi, yaitu organisasi dapat menerima *agent-agent* dengan keterampilan atau implementasi baru untuk pekerjaan-pekerjaan yang sudah berjalan sehingga meningkatkan kinerja, dan (2) kepercayaan dan efektifitas. Proses pemutusan hubungan kerja dengan *agent* dimulai dari anggota organisasi. Anggota organisasi pertama kali menyelesaikan kompromi-kompromi dengan anggota lain. Setelah kompromi dilepas, *agent* dapat meninggalkan organisasi dengan aman. Pemecatan *agent* dilakukan apabila *agent* memiliki perilaku yang tidak sesuai dengan yang diharapkan organisasi. Pengambilan keputusan pemecatan ini bergantung pada set laporan yang dikumpulkan selama *agent* bekerja di organisasi. Memonitor organisasi berarti bertanya kepada setiap anggota organisasi tentang anggota lainnya. Mekanisme ini bertujuan untuk mendeteksi apakah agent masih hidup dan mendeteksi apakah agent memenuhi kompromi-kompromi yang sudah ditentukan organisasi. Laporan-laporan yang terkumpul disimpan dan digunakan untuk mendeteksi apakah agent harus dikeluarkan dan apakah agent ini diterima kembali di masa depan. Prinsip *"Goal akan dicapai ketika agent-agent yang suka berkonflik dikeluarkan dan agent-agent yang mau berkolaborasi tetap dipelihara"* diterapkan dalam organisasi.

Setup Arsitektur Organisasi Multiagent di WSN

Pada tahap ini dilakukan penentuan peran *agent* yang akan diterapkan di WSN. Peran ini mengadopsi usulan [12] yang mendefinisikan peran *agent* ke dalam 7 peran sebagai berikut:

(1) *intelligent sensor* adalah sensor yang memonitor lingkungan. Ketika mendeteksi sebuah *event*, sensor ini melakukan *broadcast* ke *base station* (*sink*);
(2) *data centric sensor* adalah sensor yang melakukan penginderaan pada lingkungannya dan mengumpulkan data penginderaan di dalam dirinya (lokal);
(3) *agent* otonom adalah *agent* yang diletakkan di bagian lingkungan yang melakukan penginderaan dan melakukan aksi pada lingkungannya setiap saat. *Agent* ini melakukan prediksi terhadap apa yang akan dideteksi di masa yang akan datang;
(4) *mobile agent (MA)* adalah tipe *agent* spesial yang dapat mengeksekusi dirinya secara otonom untuk bermigrasi. Ketika diberangkatkan, *agent* ini bermigrasi dari *sensor node* satu ke *sensor node* lain untuk melakukan pemrosesan data secara otonom. MA mengumpulkan data *hop by hop* di dalam rentang sensor aktif dan dalam *threshold* yang ditentukan. Data yang terkumpul diakumulasi ukurannya;
(5) *directory facilitator (DF)* adalah entitas tempat *agent-agent* mengumumkan kapabilitasnya, melakukan koordinasi aktifitas-aktifitas *agent*, dan memenuhi permintaan *agent-agent* yang di bawah koordinasinya. Peran DF adalah menyimpan identitas provider (ID) beserta kapabilitasnya di *database* lokalnya. Ketika *requester* meminta preferensi, DF mencocokkannya dengan kapabilitas *provider* dan memberikan respon kepada *requester* berupa set *event-event* yang sesuai dengan permintaannya;
(6) *requester agent* adalah entitas yang melakukan *request* informasi dari sistem untuk kepentingan pengguna;
(7) *provider agent* adalah tipe *agent* yang menyediakan informasi di dalam sebuah lingkungan aktif melalui *agent-agent* superiornya. *Provider* adalah *intelligent sensor node* dan *data centric sensor* yang terhubung dengannya. Pada langkah pertama *provider* harus mendaftarkan keberadaan dirinya ke DF. Lalu, *provider* ini mengumumkan *event aktif*.

Arsitektur yang mendeskripsikan peran-peran *agent* tersebut ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Arsitektur sistem *multiagent* di WSN

Kapabilitas Agent dalam Organisasi

Salah satu kapabilitas *agent* yang harus didefinisikan adalah kemampuannya dalam melakukan pembelajaran. Salah satu pembelajaran yang dapat dilakukan oleh *agent* adalah proses deteksi *outlier* dan proses pengambilan keputusan secara otonom.

Salah satu isu penting yang perlu dipertimbangkan dalam WSN adalah *outlier*. Ketika digunakan untuk memonitoring lingkungan, *agent-agent* yang diimplementasikan di WSN dapat digunakan untuk melakukan deteksi dan klasifikasi suatu *event* atau bahkan diintegrasikan dengan sistem kontrol tertentu. Oleh sebab itu, diperlukan realibilitas dan jaminan kualitas informasi yang diterima WSN. Untuk menghindari pengiriman data yang tidak akurat ke *base station*, diperlukan implementasi analisis data secara *real time* yang dilakukan di setiap *sensor node*.

Karena kondisi lingkungan yang keras dan tidak menentu, *sensor node* dapat saja tidak berfungsi dengan baik atau menghasilkan data yang tidak akurat ke *base station*. Selain itu, keterbatasan sumber daya seperti pemrosesan yang terbatas, penyimpanan data yang terbatas, *bandwidth* yang terbatas, dan otonomi *agent* dapat juga menyebabkan ketidakakuratan data mentah yang dibaca oleh *sensor node*. Inilah dikenal dengan *outlier* di mana *sensor node* membaca data yang menyimpang dari pola data yang biasanya. Menurut [4], kemungkinan sumber *outlier* ini berasal dari *noise*, *data error* yang disebabkan karena kegagalan *hardware*, atau serangan *malicious*.

Teknik-teknik mendeteksi *outlier* dideskripsikan di [4]. Sebagian besar teknik-teknik tersebut membutuhkan kapasitas *memory* yang besar untuk penyimpanan data dan memerlukan konsumsi energi yang cukup besar. Selain itu teknik-teknik tersebut menyebabkan *overhead* pada komunikasi dan tidak mendukung kapabilitas komputasi terdistribusi. Teknik-teknik tersebut dikategorikan ke dalam pendekatan *statistical-based*, *nearest-neighbour-based*, *clustering-based*, *classification-based*, dan *spectral-decomposition-based*. *Statistical-based*

dibagi ke dalam dua metode, yaitu parametik dan non-parametrik. Kedua metode ini menitik beratkan kepada distribusi probabilitas untuk melakukan karakteristik *data set* atau *time seri* ketika melakukan evaluasi sampel data mentah secara statistik. Metode *nearest-neighbour* menitik beratkan pada matrik-matrik yang meghitung jarak antara obyek-obyek atau sample-sample dengan interpretasi geometrik. *Eucledian norm* dan *Mahalanobis distance* adalah pilihan umum yang banyak digunakan pada metode ini untuk atribut yang *univariate* dan *multivariate*. Pada teknik berbasis *clustering*, *data set* dikelompokkan ke dalam *cluster* yang memiliki atribut yang sama. Sebuah obyek dapat dikatakan sebagai *outlier* jika obyek tersebut berada di luar *cluster* yang ditentukan. Metode berbasis *classification* menitik beratkan pada teknik *machine learning* yang mencoba memahami *dataset* yang tersedia. Kelemahan teknik ini adalah secara komputasi terlalu komplek untuk diterapkan secara *real time* di *sensor node*. Terakhir, pendekatan *spectral-decomposition* yang menitik beratkan pada analisis komponen-komponen dasar untuk mengidentifikasi mode-mode normal dari perilaku *dataset*. Pendekatan ini menghasilkan kompleksitas komputasi yang tinggi.

Untuk menentukan metode yang tepat yang dapat diterapkan di *sensor node* yang memiliki sumber daya terbatas, diperkenalkanlah teknik mendeteksi *outlier* secara *real-time* lokal dan teknik mengakomodasi skema-skema yang dapat diterapkan kode program yang ditanam di *sensor node*, dapat menjalankan *thread* otonom yang kooperatif, dan diimplementasikan dalam bentuk *mobile agent*. Pendekatan yang diusulkan di [4] adalah pendekatan statistika *univariate* yang diterapkan pada sensor yang melakukan penginderaan terbatas. Pendekatan ini mengasumsikan bahwa variabel lingkungan tunggal diobservasi melalui pembacaan sensor dan digunakan untuk menentukan batasan *threshold* untuk operasi kontrol. Penyimpangan dari batasan ini akan diindikasikan sebagai *outlier*. Metodologi ini biasanya diterapkan dalam bentuk grafik *Shewhart control*. Batas atas (Δ_u) dan batas bawah (Δ_l) pada grafik *Shewhart* adalah garis kritis untuk meminimasi nilai *false outlier* dan *missed detection*. Teori hipotesis statistik dapat digunakan untuk memprediksi suatu nilai *false outer* dan *missed detection*. Misalkan variabel monitoring z, yang memiliki deviasi dari titik tengahnya, ź, adalah *additive error* dan nilai z mengikuti distribusi Gaussian $N(ź, \sigma^2)$ dengan standar deviasi σ; lalu probabilitas P di mana z berada dalam interval yang ditentukan dihitung berdasarkan:

$$P\{z < (ź - c_\alpha/2\ \sigma)\} = P\{z > (ź + c_\alpha/2\ \sigma)\} = \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$P\{(ź - c_\alpha/2\ \sigma) \leq z \leq (ź + c_\alpha/2\ \sigma)\} = 1 - \alpha \quad (2)$$

di mana $c_\alpha/2$ adalah *standard normal deviation* dan α adalah tingkat signifikansi dimana menentukan tingkat *tradeoff* antara nilai *false outlier* dan *missed detection*. Beberapa nilai yang umum digunakan pada *standard normal deviation* meliputi $c_\alpha/2 = \{1.0; 1.5; 3.0\}$.

Kemampuan *agent* lainnya yang harus dipertimbangkan adalah kemampuan berkomunikasi dengan lingkungannya tanpa dibantu oleh tutor atau guru untuk pembelajarannya [13], dikenal dengan *Reinforcement Learning* (RL). Tujuan RL adalah menemukan *policy* di mana memilih sebuah aksi pada suatu *step-time* yang mengantarkannya untuk mendapatkan *reward* terbaik dari lingkungannya. Setiap aksi yang *agent* lakukan, lingkungannya merespon dengan sebuah *reward* yang menunjukkan efektifitas aksi di setiap *step-time*. Pada aksi yang dilakukan, *agent* tidak menganut benar atau tidaknya aksi yang dilakukan.

RL adalah subarea *machine learning* yang menitikberatkan kepada cara sebuah *agent* mengambil aksi di lingkungannya. Di sini agent melakukan maksimalisasi pemikiran tentang *reward* untuk jangka panjang. Pada setiap langkah, RL memilih beberapa aksi yang mungkin dilakukan dan menerima *reward* dari lingkungan atas aksi spesifik yang dilakukannya. Aksi terbaik yang harus dilakukan di beberapa *state* tidak pernah diketahui sehingga agent harus mencoba beberapa aksi-aksi dan urutan-urutan aksi yang berbeda serta belajar dari pengalamannnya.

Menurut [13], RL biasanya dideskripsikan sebagai *Markov Decission Process* (MDP) yang terdiri dari sebuah *agent*, set *state* yang mungkin *S*, set aksi-aksi yang mungkin *A(S)* untuk semua *state S*, dan sebuah fungsi *reward R(s,a)* yang menentukan *reward* yang diberi lingkungan atas aksi yang dilakukan *agent*. Fungsi *policy* π mendeskripsikan bagaimana *agent* belajar pada beberapa *time-step t*. *Policy* optimal didefinisikan sebahai π*. Fungsi *value V(s,a)* mendefinisikan *reward* total yang diharapkan ketika melakukan aksi *a* pada state *s* jika untuk mencapai *state* berikutnya *agent* mengikuti *policy* optimal π*. *Agent* harus belajar untuk memperoleh *policy* ini.

Kemampuan terakhir yang perlu dipertimbangkan oleh agent terkait *mobile agent* adalah *itinerary planning*.

Itinerary adalah rute yang dilalui selama migrasi *mobile agent*. Teknik-teknik *itinerary* yang dapat dipertimbangkan menurut [5] meliputi *Local Closest First* (LCF), *Global Closest First* (GCF), *Genetic Algorithm* (GA), *Near-Optimal Itinerary Design* (NOID), dan *Tree-Based Itinerary Design* (TBID). Parameter-parameter yang perlu diukur dalam menentukan kinerja *itinerary planning* adalah *data aggregation cost*, *response time*, dan *estimated network lifetime*.

Perlu dipertimbangkan pula pendekatan *multiple mobile agent itinerary planning* (MIP) yang diajukan [6], sebagai alternatif single *mobile agent itinerary planning* (SIP). Masalah MIP menurut [6] dibagi ke dalam empat tahapan, yaitu pemilihan *visiting central location* (VCL) untuk setiap *mobile agent*, penentuan *node-node* sumber setiap *mobile agent*, penentuan urutan kunjungan ke sumber, dan *iterative framework*.

Salah satu algoritma yang dapat digunakan dalam *itinerary planning* adalah *Genetic Algorithm* (GA). Algoritma ini memberikan kinerja yang lebih baik daripada LCF dan GCF [5]. Namun demikian, GA mengkonsumsi waktu komputasi yang cukup lama karena algoritma ini memulai eksekusinya dengan vektor solusi yang random yang memerlukan waktu relatif lama. Meskipun optimasi global akan diperoleh, namun penggunaan algoritma ini bukan solusi yang ringan untuk *sensor node* yang memiliki energi terbatas.

Penentuan Middleware dan Hardware

Menurut [2], *mobile agent* didefinisikan sebagai entitas *software* yang me-enkapsulasi perilaku dinamis dan punya kemampuan untuk bermigrasi dari satu *node* komputasi ke *node* lainnya untuk menyelesaikan tugas-tugas terdistribusi. *mobile agent* dapat mendukung pemrograman WSN pada tingkat aplikasi, *middleware*, dan *network*. *mobile agent* didukung oleh *Mobile Agent System* (MAS) yang menyediakan API untuk mengembangkan aplikasi berbasis *agent*, *agent server* yang mengeksekusi agent-agent dengan

menyediakan layanan dasar seperti migrasi, komunikasi, dan pengaksesan sumber daya *node*. Salah satu *middleware* yang akan dipertimbangkan dalam pengembangan sistem *multiagent* di WSN adalah *Mobile Agent for Sun Spot* (MAPS), dan AFME seperti yang dijelaskan di Subbab IV.

MAPS menurut [2] merupakan *framework* inovasi berbasis Java yang dikembangkan di atas teknologi Sun Spot untuk memfasilitasi pemrograman berorientasi *agent* di WSN. MAPS dirancang berdasarkan kebutuhan :

(1) *component-based lightweight agent server architecture* untuk mencegah model kerja sama dan *concurency* yang berat;
(2) *lightweight agent architecture* untuk mengeksekusi dan migrasi *agent* secara efisien;
(3) *core service* yang minimal seperti migrasi *agent*, penamaan *agent*, komunikasi *agent*, pengaksesan sumber daya sensor (*sensor*, *actuator*, *flash memory*, dan radio);
(4) *plug-in based architecture extension;*
(5) bahasa Java untuk mendefinisikan perilaku *mobile agent.*

MAPS menurut [7] dapat diinteroperasikan dengan JADE *framework*. JADE-MAPS *gateway* telah dikembangkan untuk memungkinkan *agent-agent* JADE berinteraksi dengan *agent-agent* MAPS. Meskipun JADE dan MAPS menggunakan *platform* Java, keduanya menggunakan metode komunikasi yang berbeda. JADE mengirim pesan berdasarkan standar FIPA menggunakan spesifikasi *Agent Communication Language* (ACL), sedangkan MAPS membuat komunikasi pesannya sendiri berbasis *event*. Oleh sebab itu JADE-MAPS *gateway* memfasilitasi pertukaran pesan antara *agent-agent* MAPS dengan JADE. *Platform* inter komunikasi MAPS dengan JADE memungkinkan pengembangan lebih lanjut aplikasi terdistribusi berbasis WSN di mana JADE digunakan pada *base station*/koordinator/*host* dan MAPS diletakkan pada *sensor node*.

AFME sebagaimana telah dibahas di Subbab IV menurut [2] merupakan *agent paltform* yang merujuk pada J2ME MIDP ringan *open source* dan menerapkan *Agent Factory Framework* yang ada. AFME ditujukan untuk sistem *wireless pervasive* sehingga secara spesifik AFME tidak dirancang untuk WSN. Namun, karena dukungan J2ME kepada *platform* sensor Sun Spot, AFME dapat diadopsi untuk pengembangan aplikasi WSN berbasis *agent*. AFME berbasis pada pradigma *Belief-Desire-Intention* di mana di dalamnya *agent-agent* mengikuti siklus *sense-deliberate-act*. AFME mendeskripsikan *agent* melalui *mixed declarative/imperative programming model* bernama *Agent Factory Agent Programming Language* (AFAPL), berbasis formalisme logik *belief* dan *commitment.* AFAPL digunakan untuk me-*encode* perilaku *agent* dengan menentukan aturan-aturan yang mendefinisikan kondisi-kondisi dimana komitmen diadopsi.

Berbeda dengan MAPS dan AFME yang tidak mendukung migrasi yang kuat, *isolate* (*weak*) *migration*, di mana kedua platform ini hanya mendukung migrasi *state* obyek atau data, bukan kode, *Mobile Agent Platform for Sun Spot* (MASPOT), menurut [3] memungkinkan migrasi kode *agent* (*strong migration*) sehingga berdampak pada tidak hanya penghematan energi, namun juga adanya penghematan pada sumber daya *memory*. Jika ingin menerapkan platform *mobile agent* di MAPS dan AFME, kode-kode *agent* yang melakukan tugas spesifik harus diinstall terlebih dahulu di *sensor node*. Sedangkan dengan MASPOT hal ini tidak perlu dilakukan karena MASPOT menyediakan solusi terkait dengan migrasi kode program. Eksperimen yang dilakukan [3] menunjukkan jumlah energi yang dihabiskan selama migrasi kode adalah sebesar 0.03% dari baterai *sensor node*. Selain itu, MASPOT hanya menggunakan 1.5% saja alokasi *flash memory* dari *node* Sun Spot. Namun, *strong migration* mengkonsumsi energi yang lebih besar daripada *weak migration* yang diterapkan oleh MAPS dan AFME.

Perangkat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sun Spot (*Small Programmable Object Technology*). Sun Spot terdiri dari 32-bit ARM9 CPU, 512K memori, 2 Mb *flash storage* dan *wireless networking* berbasis pada ChipCon CC2420 yang mengikuti standar 802.15.4, terintergasi dengan antena, dan beroperasi pada 2.4GHz sampai 2.4835GHz ISM *unlicensed bands*. IC-nya terdiri dari 2.4 GHz RF *transmitter/receiver* dengan *digital direct sequence spread spectrum* (DSSS) *baseband modem* dengan dukungan MAC. Sensor yang sudah terdapat pada Sun Spot meliputi sensor temperatur, sensor cahaya, dan *accelerometer* 3D. Sensor lain dapat ditambahkan melalui pin analog I/O yang sudah disediakan. Sensor ini cukup ideal untuk penerapan *multiagent* yang menurut [2] dan [3] dapat dipasang *middleware* MAPS, AFME, dan MASPOT.

6. KESIMPULAN

Banyak penelitian yang dilakukan terkait usulan penyelesaian masalah yang dihadapi di WSN, namun sebagian besar penelitian tersebut terlalu fokus pada aspek tertentu dan siftanya parsial seperti fokus di optimasi kemunikasi, fokus di *cross layer protocol*, atau di *mobile agent* tanpa memperhatikan aspek arsitektur sistem secara keseluruhan dan terintegrasi.

Paper ini mendeskripsikan usulan pemodelan sistem *multiagent* pada WSN yang menjadi solusi untuk efektifitas dan efisiensi kerja WSN yang memiliki keterbatasan, khususnya energi. Dalam pengembangan *multiagent* di WSN perlu memperhatikan aspek-aspek penting yang dapat mendukung kinerja WSN seperti aspek arsitektur, aspek *middleware*, aspek *hardware*, aspek *itinerary planning*, dan aspek kapabilitas *agent-agent* dalam sistem.

Pada aspek arsitektur perlu dirancang struktur organisasi *multiagent*. Di sini diidentifikasi organisasi, peran, dan aturan-aturan yang mengikat *agent-agent* dalam menjalankan fungsinya. Organisasi selanjutnya diperinci dengan penerapan konsep *goal*, *workflow*, struktur grup, dan sumber daya. Pada aspek *middleware* perlu diidentifikasi API yang didukung oleh perangkat WSN spesifik. *Middelware* ini menyediakan antarmuka kepada *service-service* yang disediakan di WSN secara *loose coupling* sehingga fokus penelitian ditekankan pada aspek kapabilitas *multiagent*. *Middleware* yang perlu dipertimbangkan dalam penelitian ini adalah AFME yang dijalankan pada perangkat Sun Spot. *Middleware* ini mendukung arsitektur BDI yang merupakan arsitektur yang akan diangkat dalam penelitian ini. Terakhir, kapabilitas *agent* perlu diidentifikasi seperti kemampuan dalam *itinerary planning*, kemampuan pembelajaran khususnya mendeteksi *outlier*, dan pengambilan keputusan secara otonom terkait dengan aksi-aksi yang dilakukan.

Pekerjaan selanjutnya adalah pengembangan secara lebih terperinci kapabilitas *agent* yang akan terlibat sebagai anggota dalam organisasi di lingkungan WSN. Kapabilitas tersebut adalah melakukan pembelajaran dan menentukan keputusan melakukan aksi tertentu secara otonom dengan menerapkan arsitektur BDI yang dikombinasikan dengan MDP. Selain itu,

mempertimbangkan protokol komunikasi standar antar *agent*, mengadopsi *Service Oriented Architecture* (SOA) atau mikro SOA, sehingga *agent* dengan *platform* berbeda dapat saling berkomunikasi adalah langkah selanjutnya yang sangat penting,

7. DAFTAR PUSTAKA

[1] Min Chen, Sergio Gonzalez, and Victor C. M. Leung, "*Application and Design Issues For Mobile Agent in Wireless Sensor Networks"*, University of British Columbia, IEEE Wireless Communication, 2007.

[2] Stefano G, Francesco Aielo, Alesio Carbone, Giancarlo Fortino, "*Java-Based Mobile Agent Platform for Wireless Network Sensor"*, the International Multiconference on Computer Science and Information Technology, 2010, pp. 165–172.

[3] Ramon Lopes, Flavio Assis. "*MASPOT: A Mobile Agent System for Sun SPOT"*, LaSiD-Distributed Systems Laboratory DCC-Department of Computer Science UFBA-Federal University of Bahia. Salvador, Brazil, Tenth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, 2011.

[4] Paulo Gil, Amâncio Santos, and Alberto Cardoso, "*Dealing With Outliers in Wireless Sensor Networks: An Oil Refinery Application"*, IEEE transactions on control systems technology, 2013.

[5] Charalampos K, Aristides Mpitziopoulos, Damianos G, Grammati Pantziou, "*Effective Determination of Mobile Agent Itineraries for Data Aggregation on Sensor Networks"*, IEEE Transactions On Knowledge And Data Engineering, Vol. 22, No. 12, December 2010.

[6] X. Wang, M. Chen, T.Kwon, H.C. Chao*, "Multiple Mobile Agents Itinerary Planning in Wireles Sensor Network : Survey and Evaluation"*, IET Communications, 2010, www.ietdl.org.

[7] Giancarlo F, Stefano Galzarano, Raffaele Gravina, Antonio Guerrieri, "*Agent-based Development of Wireless Sensor Network Applications"*, DEIS–University of Calabria. 2010.

[8] Michael Wooldridge, "*Introduction to MultiAgent System"*, John Wiley and Sons LTD, 2002

[9] Bellefemine Fabio, Giovanni Caire, Dominic Greenwood. "*Chapter 2 Agent Technology Overview. Developing MultiAgent System with JADE*", John Wiley and Sons LTD, 2007.

[10] Conor Muldoon, Geogory M. P. O'here, Rem W. Collier, Michaerl J. O'Grady, "*Toward Pervasive Intteligence : Reflection on The Evolution of Agent Factory Framework*", Springer Science and Business Media LC, 2009.

[11] Jorge J. Gómez-Sanz, Juan Pavón, "*Implementing Multi-Agent Systems Organizations with INGENIAS*", Dep. Sistemas Informáticos y Programación Universidad Complutense de Madrid.

[12] Khin Haymar S.H, YoungSik Choi, Jong Sou Park, "*The Multi Agent System Solutions for Wireless Sensor Network Applications"*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

[13] Raghavendra V. Kulkarni, Anna Förster, Ganesh Kumar Venayagamoorthy, ", Computational Intelligence in Wireless Sensor Networks: A Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 1, First Quarter 2011.