**VERIFIKASI ALGORITMA PENGHAPUSAN POHON MERAH-HITAM MIGHT MENGGUNAKAN LIQUID HASKELL**

**Laporan Tugas Akhir**

**Disusun sebagai syarat kelulusan tingkat sarjana**

**Oleh**

**Hafizh Afkar Makmur**

**NIM : 13514062**



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA**

**SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA**

**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG**

**Juli 2021**

**VERIFIKASI ALGORITMA PENGHAPUSAN POHON MERAH-HITAM MIGHT MENGGUNAKAN LIQUID HASKELL**

**Laporan Tugas Akhir**

**Oleh**

**Hafizh Afkar Makmur**

**NIM : 13514062**

**Program Studi Teknik Informatika**

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung

Telah disetujui dan disahkan sebagai Laporan Tugas Akhir

di Bandung, pada tanggal 13 Juli 2021

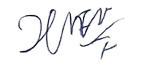
|  |  |
| --- | --- |
| Pembimbing I,  Riza Satria Perdana, ST., MT  NIP 197006091995121002 | Pembimbing II,  Yanti Rusmawati, Ph.D.  NIP 119110077 |

**LEMBAR PERNYATAAN**

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Pengerjaan dan penulisan Laporan Tugas Akhir ini dilakukan tanpa menggunakan bantuan yang tidak dibenarkan.
2. Segala bentuk kutipan dan acuan terhadap tulisan orang lain yang digunakan di dalam penyusunan laporan tugas akhir ini telah dituliskan dengan baik dan benar.
3. Laporan Tugas Akhir ini belum pernah diajukan pada program pendidikan di perguruan tinggi mana pun.

Jika terbukti melanggar hal-hal di atas, saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan Peraturan Akademik dan Kemahasiswaan Institut Teknologi Bandung bagian Penegakan Norma Akademik dan Kemahasiswaan khususnya Pasal 2.1 dan Pasal 2.2.

Bandung, 13 Juli 2021

Hafizh Afkar Makmur

NIM 13514062

ABSTRAK

**VERIFIKASI ALGORITMA PENGHAPUSAN POHON MERAH-HITAM MIGHT MENGGUNAKAN LIQUID HASKELL**

Oleh

Hafizh Afkar Makmur

NIM : 13514062

Meningkatnya kebutuhan manusia terhadap perangkat lunak menimbulkan kebutuhan yang sangat mendesak untuk program yang tidak memiliki kesalahan. Salah satu perangkat lunak yang dikembangkan untuk tujuan tersebut adalah Liquid Haskell untuk bahasa pemrograman Haskell. Sifat Liquid Haskell yang otomatis dan tidak memerlukan modifikasi kode dapat memudahkan proses verifikasi dengan sangat banyak sehingga memungkinkan verifikasi program yang lebih banyak dari sebelumnya. Namun kemudian timbul pertanyaan apakah Liquid Haskell benar-benar bisa memverifikasi semua program yang dituliskan dalam bahasa Haskell.

Salah satu kasus yang sangat umum dijadikan contoh untuk mempelajari metode formal adalah kasus verifikasi struktur data *Red-Black Tree* atau Pohon Merah-Hitam (RBT). Pada 2010, Matthew Might membuat sebuah modifikasi terhadap struktur data RBT dengan tujuan untuk membuat sebuah algoritma penghapusan yang lebih elegan daripada algoritma yang sudah dituliskan sebelumnya. Struktur data ini merupakan struktur data yang sederhana dan memiliki spesifikasi yang sangat jelas dan mudah dituliskan sehingga algoritma ini bisa menjadi target yang tepat untuk membuktikan apakah Liquid Haskell bisa memverifikasi kode yang sudah ditulis oleh orang lain di dunia nyata.

Hasil verifikasi dan analisis pada kode tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar kode pada program berhasil diterima oleh verifikasi namun ada 3 bagian dari program yang digagalkan oleh verifikasi yaitu semua baris kode yang berhubungan dengan *QuickCheck*, properti BST untuk struktur pohon, serta baris terakhir pada fungsi balance. Oleh karena itu, dilakukan beberapa modifikasi kode sebagai contoh dari *syntax* yang dibutuhkan agak sebuah kode yang valid dapat diverifikasi dengan baik oleh Liquid Haskell.

Kata kunci: Red-Black Tree, Liquid Haskell, Metode Formal

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Mahakuasa diucapkan. Atas rahmat dan perlindungan-Nya akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Selama dua tahun terakhir ini, banyak pihak yang telah membantu penulis. Untuk itu, penulis menghaturkan terima kasih banyak kepada:

1. Bapak Riza Satria Perdana, ST., MT serta Ibu Yanti Rusmawati, Ph.D. selaku dosen pembimbing yang selalu mengingatkan penulis untuk menyelesaikan kuliah selain Tugas Akhir dan membimbing penulis dalam membuat Tugas Akhir ini.

2. Ibu Dr. Dessi Puji Lestari, S.T., M.Eng., selaku kaprodi yang telah sangat membantu penulis dalam administrasi maupun semangat dalam pengerjaan tugas akhir.

3. Bapak Yudistira Dwi Wardhana Asnar, S.T, Ph.D. selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan masukan perbaikan Tugas Akhir saat seminar dan sidang.

4. Bapak Nugraha Priya Utama, PhD selaku dosen mata kuliah Tugas Akhir yang selalu membantu penulis dalam masalah administrasi Tugas Akhir.

5. Bapak Dr. Judhi Santoso, M.Sc. selaku dosen wali yang telah memberikan bantuan selama masa perkuliahan kepada penulis.

6. Staf Tata Usaha STEI ITB, Pak Edi, Pak Suranto, staf frontdesk serta staf lainnya yang telah memberikan bantuan.

7. Mr. Ranjit Jhala, Ms. Nikki Vazou, serta Mr. Andres Löh yang telah sangat membantu penulis dalam menjelaskan cara kerja dan *syntax* dari Liquid Haskell

8. Ms. Stephanie Weirich karena bimbingannya dalam menjelaskan cara kerja dari struktur data Pohon Merah-Hitam serta spesifikasi yang harus dipenuhi oleh struktur data tersebut.

9. Adi Purnama dan Richard Wellianto sebagai teman saya yang telah membantu saya dalam mengecek *draft* saya dan mendukung saya dalam penulisan tugas akhir ini.

10. Keluarga saya yang selalu membantu secara material dan moral selama menjalani perkuliahan dan menyemangati penulis.

11. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir angkatan 2014 yang selalu mendukung penyelesaian Tugas Akhir.

12. Adik-adik tingkat yang membantu penulis saat perkuliahan biarpun penulis beda angkatan.

14. Semua pihak lain yang tidak secara langsung membantu saat perkuliahan, kerja praktek, dan penyelesaian Tugas Akhir.

Akhir kata, semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat.

Bandung, September 2020

Penulis

DAFTAR ISI

[ABSTRAK 2](#_Toc77813240)

[KATA PENGANTAR 3](#_Toc77813241)

[DAFTAR ISI 5](#_Toc77813242)

[DAFTAR LAMPIRAN 8](#_Toc77813243)

[DAFTAR GAMBAR 9](#_Toc77813244)

[BAB I PENDAHULUAN 10](#_Toc77813245)

[I.1 Latar Belakang 10](#_Toc77813246)

[I.2 Rumusan Masalah 12](#_Toc77813247)

[I.3 Tujuan 12](#_Toc77813248)

[I.4 Batasan Masalah 12](#_Toc77813249)

[I.5 Metodologi 13](#_Toc77813250)

[I.6 Sistematika Pembahasan 13](#_Toc77813251)

[BAB II STUDI LITERATUR 15](#_Toc77813252)

[II.1 Liquid Haskell 15](#_Toc77813253)

[II.1.1 Penggunaan Liquid Haskell 15](#_Toc77813254)

[II.1.2 Alur Kerja Liquid Haskell 23](#_Toc77813255)

[II.2 Pohon Merah-Hitam 29](#_Toc77813256)

[II.2.1 Objek-Objek Teori Graf 31](#_Toc77813257)

[II.2.2 Pohon Pencarian Biner 31](#_Toc77813258)

[II.2.3 Pohon Merah-Hitam 32](#_Toc77813259)

[II.2.4 Algoritma penambahan Okasaki 34](#_Toc77813260)

[II.2.5 Algoritma penghapusan Matt Might 36](#_Toc77813261)

[II.3 Implementasi Pohon Merah-Hitam dan Verifikasi 42](#_Toc77813262)

[II.3.1 Implementasi RBT Might dalam Bahasa Haskell 42](#_Toc77813263)

[II.3.2 Usaha Verifikasi Sebelumnya terhadap Program 43](#_Toc77813264)

[BAB III ANALISA DAN RENCANA PENULISAN SPESIFIKASI 51](#_Toc77813265)

[III.1 Analisis Spesifikasi/Kebutuhan 51](#_Toc77813266)

[III.1.1 Penanganan *exception*/error 51](#_Toc77813267)

[III.1.2 Tiga Properti RBT 52](#_Toc77813268)

[III.1.3 Spesifikasi untuk Fungsi yang digunakan oleh Fungsi Lain 53](#_Toc77813269)

[III.1.4 Pembuktian Kerja Fungsi Utama 53](#_Toc77813270)

[III.1.5 Normalisasi Seluruh Warna pada Pohon 54](#_Toc77813271)

[III.2 Spesifikasi untuk Setiap Fungsi 54](#_Toc77813272)

[III.2.1 Fungsi-fungsi yang memiliki fungsi error 54](#_Toc77813273)

[III.2.2 Penyesuaian Spesifikasi Tiga Properti RBT dalam Makalah Vazou 56](#_Toc77813274)

[III.2.3 Fungsi-Fungsi yang digunakan oleh Fungsi Utama 57](#_Toc77813275)

[III.3 Percobaan Verifikasi Manual 61](#_Toc77813276)

[III.4 Rencana Pelaksanaan Verifikasi 62](#_Toc77813277)

[BAB IV IMPLEMENTASI DAN VERIFIKASI 64](#_Toc77813278)

[IV.1 Implementasi Penulisan Spesifikasi 64](#_Toc77813279)

[IV.1.1 Fungsi-Fungsi Pembantu 64](#_Toc77813280)

[IV.1.2 Spesifikasi untuk Setiap Fungsi 73](#_Toc77813281)

[IV.2 Hasil Verifikasi dan Analisis 85](#_Toc77813282)

[IV.3 Modifikasi Program untuk Memenuhi Verifikasi 86](#_Toc77813283)

[BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 89](#_Toc77813284)

[V.1 Kesimpulan 89](#_Toc77813285)

[V.2 Saran 89](#_Toc77813286)

[DAFTAR REFERENSI 90](#_Toc77813287)

DAFTAR LAMPIRAN

[Lampiran A. Sumber Kode Implementasi Algoritma Penghapusan RBT Might 91](#_Toc77813288)

[Lampiran B. Sumber Kode dan Spesifikasi 97](#_Toc77813289)

[Lampiran C. Sumber Kode yang telah Dimodifikasi beserta Spesifikasi 106](#_Toc77813290)

DAFTAR GAMBAR

[Gambar II.1. Sintaksis Liquid Haskell (Rondon et al., 2008) 18](#_Toc77813291)

[Gambar II.2. Liquid Haskell *Workflow* (Vazou et al., 2014) 23](#_Toc77813292)

[Gambar II.3. Aturan Pengecekan *Liquid Type* (Rondon et al., 2008) 27](#_Toc77813293)

[Gambar II.4. Algoritma *Liquid Type Inference* (Rondon et al., 2008) 29](#_Toc77813294)

[Gambar II.5. Contoh Pohon Pencarian Biner. 32](#_Toc77813295)

[Gambar II.6. Gambar II.5 yang diubah menjadi RBT. 34](#_Toc77813296)

[Gambar II.7. Empat kasus pelanggaran properti warna 35](#_Toc77813297)

[Gambar II.8. Pohon hasil penyeimbangan 36](#_Toc77813298)

[Gambar II.9. Enam pohon yang memiliki simpul berwarna BB 39](#_Toc77813299)

[Gambar II.10. Hasil operasi fungsi *bubble* 39](#_Toc77813300)

[Gambar II.11. Pohon dengan simpul berwarna BB dan NB 41](#_Toc77813301)

[Gambar II.12. Pohon hasil penyeimbangan 41](#_Toc77813302)

# PENDAHULUAN

.

## Latar Belakang

Seorang pemrogram menginginkan programnya bebas dari kesalahan. Banyak waktu yang sudah terhabiskan oleh berbagai perusahaan teknologi untuk memastikan bahwa produk yang mereka rilis tidak memiliki kecacatan berarti yang mungkin saja bisa menelan korban jiwa. Kesalahan atau *bug* yang bisa ditangkap di awal proses pengembangan sebuah program bisa diatasi dengan lebih mudah daripada *bug* yang hanya disadari jauh dalam sebuah proses pengembangan.

Beberapa program untuk verifikasi membutuhkan kode untuk diverifikasi dituliskan kembali secara terpisah dalam bahasa pemrograman khusus tertentu. Pada program-program ini, pengguna harus memastikan bahwa kode yang dituliskan untuk program verifikasi merupakan program yang ekuivalen dengan program yang sebenarnya dengan usahanya sendiri. Beberapa program verifikasi lain tidak membutuhkan penulisan ulang kode program dalam bahasa terpisah yang khusus sehingga tidak perlu ada usaha tambahan untuk melakukan hal tersebut. Salah satu perangkat lunak yang dikembangkan untuk tujuan tersebut adalah Liquid Haskell untuk bahasa pemrograman Haskell. Pada dasarnya bahasa pemrograman berparadigma fungsional sudah mengalami keunggulan untuk pengaplikasian Metode Formal karena sifat bahasa tersebut yang transparan dan tidak menghasilkan “efek samping” saat mengeksekusi suatu fungsi sehingga seorang analis bisa dengan mudah melihat efek dari interaksi antara berbagai fungsi tanpa harus mempertimbangkan bahwa hasil dari interaksi tersebut mungkin berbeda dengan masukan yang sama; sama seperti sebuah fungsi matematika yang konvensional. Karena itu Haskell sebagai sebuah bahasa fungsional murni juga memungkinkan kemudahan pengaplikasian Metode Formal pada program yang dituliskan pada bahasa tersebut. Liquid Haskell memanfaatkan kemudahan ini dengan mengintegrasikan *SMT Solver* seperti Z3 atau CVC4 dan memanfaatkan perangkat tersebut untuk melakukan verifikasi pada program yang dibuat pada Haskell secara otomatis. Hal ini memungkinkan spesifikasi dituliskan langsung pada program. Kemudian dilakukan verifikasi otomatis program terhadap spesifikasi yang sudah tertulis yang membuat proses Metode Formal menjadi lauh lebih mudah dibandingkan dengan verifikasi yang dilakukan secara manual.

Namun kemudian timbul pertanyaan apakah Liquid Haskell benar-benar bisa memverifikasi semua program yang dituliskan dalam bahasa Haskell. Dibutuhkan berbagai percobaan untuk memastikan bahwa Liquid Haskell bisa langsung digunakan untuk mengecek bahwa program yang sudah dituliskan oleh seseorang sudah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan.

Salah satu kasus yang sangat umum dijadikan contoh untuk mempelajari metode formal adalah kasus verifikasi struktur data *Red-Black Tree* atau Pohon Merah-Hitam (RBT). Struktur data ini merupakan struktur data yang sederhana dan memiliki spesifikasi yang sangat jelas dan mudah dituliskan. Bahkan, struktur data ini sudah disebutkan dalam artikel jurnal yang dituliskan oleh Nikki Vazou yang membicarakan pengaplikasian Liquid Haskell di dunia nyata (Vazou et al., 2014). Namun, kasus yang disebutkan merupakan sebuah kasus abstrak sebagai contoh teoretis mengenai solusi untuk memverifikasi sebuah program RBT yang ada di dunia nyata. Masih timbul pertanyaan apakah Liquid Haskell mampu memverifikasi program RBT yang tidak sepenuhnya sesuai dengan contoh teoretis yang disebutkan.

Pada 2010, Matthew Might (Might, 2010) membuat sebuah modifikasi terhadap struktur data RBT dengan tujuan untuk membuat sebuah algoritma penghapusan yang lebih elegan daripada algoritma yang sudah dituliskan sebelumnya. Hal ini dilakukan dengan menambahkan 2 buah warna *Double Black* (BB) dan *Negative Black* (NB) untuk memudahkan jalan kerja algoritma. Dalam artikel selanjutnya dia mencoba untuk memverifikasi programnya dengan menggunakan *library* QuickCheck dalam Haskell. Kemudian pada tahun 2014, Stephanie Weirich (Weirich, 2014) menggunakan sistem tipe Haskell yang sangat ketat bernama GADT (*Generalized Algebraic Datatype*) untuk memastikan bahwa algoritma tersebut benar-benar sesuai dengan spesifikasi yang dikodifikasi dalam tipe-tipe masukan dan keluaran dalam setiap fungsi dalam program. Melihat usaha-usaha sebelumnya dalam memverifikasi algoritma ini, algoritma ini bisa menjadi target yang tepat untuk membuktikan apakah Liquid Haskell bisa memverifikasi kode yang sudah ditulis oleh orang lain di dunia nyata.

## Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan fokus masalah tersebut, dirumuskan beberapa masalah yang sebaiknya diselesaikan:

1. Bagaimana melakukan verifikasi algoritma penghapusan Pohon Merah-Hitam oleh Matt Might menggunakan Liquid Haskell?
2. Apakah Liquid Haskell mampu memverifikasi sebuah implementasi algorithma penghapusan Pohon Merah-Hitam oleh Matt Might tanpa perlu adanya modifikasi terhadap implementasi tersebut?

## Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menggunakan Liquid Haskell untuk memverifikasi program penghapusan Red-Black Tree oleh Matt Might
2. Menganalisis kemampuan Liquid Haskell untuk memverifikasi sebuah kode yang berasal dari dunia nyata tanpa modifikasi dan mengidentifikasi kekurangan Liquid Haskell jika hal itu tidak mampu dilakukan.

## Batasan Masalah

Batasan permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Spesifikasi dan Verifikasi Liquid Haskell yang diimplementasikan tidak menggunakan fitur *reflection*, *bounded refinements*, maupun *abstract refinements*.
2. Spesifikasi tidak berisi keterangan bahwa program harus berhenti dan tidak akan berjalan terus-menerus tanpa akhir.
3. Verifikasi tidak akan memaksa seluruh fungsi untuk memiliki totalitas (sebuah fungsi harus bisa menangani seluruh argumen tanpa kecuali).

## Metodologi

Metodologi pengerjaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan penelitian mendalam terhadap algoritma Red-Black Tree dan Liquid Haskell dengan menggunakan berbagai referensi baik daring maupun luring serta melakukan konsultasi kepada ahli dalam bidang yang berkaitan.

1. Penentuan Spesifikasi Program

Ditentukan spesifikasi yang harus bisa dipenuhi oleh program. Spesifikasi dituliskan berbentuk *precondition* dan *postcondition* untuk setiap fungsi yang ada dalam program.

1. Implementasi Liquid Haskell dan Verifikasi Program

Setiap spesifikasi yang sudah ditentukan sebelumnya diimplementasikan dalam bahasa Liquid Haskell. Kemudian program diverifikasi dengan menggunakan spesifikasi program untuk menentukan apakah program benar-benar memenuhi spesifikasi-spesifikasi tersebut.

## Sistematika Pembahasan

Laporan tugas akhir ini terdiri atas lima bab, yaitu pendahuluan, studi literatur, analisa dan rencana penulisan spesifikasi, implementasi dan verifikasi, serta kesimpulan dan saran.

Bab I Pendahuluan mencurahkan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, dan sistematika pembahasan tugas akhir.

Bab II Studi Literatur mencurahkan tentang pengetahuan yang digunakan dalam

tugas akhir. Pengetahuan yang digunakan mencakup tentang Liquid Haskell, Pohon Merah-Hitam (RBT) terutama modifikasi yang dilakukan oleh Matt Might, serta usaha-usaha verifikasi sebelumnya terhadap kode tersebut dengan menggunakan beberapa metode lain.

Bab III Analisa dan Rencana Penulisan Spesifikasi menjelaskan mengenai langkah-langkah yang dilakukan sebelum penulisan spesifikasi di antaranya adalah analisis dari kebutuhan yang harus diverifikasi serta struktur data dari program itu sendiri. Dalam bab ini juga dijelaskan mengenai teknis pelaksanaan verifikasi.

Bab IV Implementasi dan Verifikasi mencurahkan tentang penulisan kode-kode yang dibutuhkan untuk kodifikasi spesifikasi dimulai dari penulisan fungsi-fungsi pembantu hingga penulisan spesifikasi pada fungsi-fungsi yang membutuhkan. Kemudian dijelaskan mengenai verifikasi yang dilakukan serta analisis dari hasil serta saran untuk perlakukan modifikasi terhadap program untuk memudahkan verifikasi selanjutnya.

Bab V Kesimpulan dan Saran mencurahkan tentang kesimpulan pelaksanaan tugas akhir beserta saran untuk pengembangan selanjutnya.

# STUDI LITERATUR

## Liquid Haskell

Liquid Haskell adalah implementasi teknologi *Liquid Types* (Rondon et al., 2008)yang digunakan untuk membantu memverifikasi sebuah program berbahasa Haskell (Peña, 2017). *Liquid Types* atau *Logically Qualified Data Types* adalah sebuah sistem yang mengombinasikan inferensi tipe *Hindley-Milner* dengan *Predicate Abstraction* untuk menghasilkan secara inferensi tipe secara otomatis yang bisa dicek secara mudah oleh *SMT Solver* otomatisseperti Z3 atau CVC4. Liquid Haskell pada dasarnya melakukan konversi sebuah program Haskell menjadi *Liquid Types* yang sesuai dengan karakteristik program untuk kemudian diberikan pada *SMT Solver* untuk dicek kebenarannya. Jika terjadi inkonsistensi pada *Liquid Types* yang diterima maka bisa diputuskan bahwa program Haskell yang diberikan memiliki *bug* yang mampu merusak konsistensi program.

### Penggunaan Liquid Haskell

#### *Predicate Logic*

Liquid Haskell mendasarkan struktur logika yang digunakan dengan menggunakan *Predicate Logic* atau dikenal pula dengan nama *First-Order Logic*. Dalam logika ini, terdapat dua jenis objek yaitu *term* dan *formula* (Huth & Ryan, 2004). *Term* menyatakan objek-objek yang terlibat dalam logika seperti sebuah benda khusus atau sebuah variabel. *Formula* menyatakan hubungan dari *term* tersebut serta memiliki nilai kebenaran yang memiliki kemungkinan benar dan salah.

Secara umum sebuah kalimat dalam *Predicate Logic* dapat ditulis dalam bentuk sebagaimana berikut

Dalam bentuk ini x melambangkan variabel, c melambangkan konstanta, serta f melambangkan fungsi predikat yang dimiliki oleh objek-objek tersebut. Kemudian hubungan antara formula dapat dilambangkan sebagaimana berikut

Simbol ¬ melambangkan negasi dari sebuah formula. Simbol ∧, ∨, dan → masing-masing melambangkan operasi dan, atau, dan implikasi. Simbol ∀ dan ∃ masing-masing melambangkan bahwa formula φ berlaku untuk keseluruhan x atau hanya sebagian dari x. Kedua simbol ini merupakan perbedaan paling utama dari *predicate logic* dengan *propositional logic* yang tidak mengenali perbedaan sebagian dan keseluruhan.

Sistem *predicate logic* dan penurunannya merupakan sistem yang sangat mendasar dalam konstruksi *Liquid Types* dan memungkinkan tipe ini untuk diselesaikan secara otomatis oleh sebuah *SMT Solver*. *Liquid Types* merupakan bagian dari tipe yang memiliki predikatyang dapat diproses secara otomatis karena tipe ini menggunakan bahasa *predicate logic* yang dibatasi pada logika yang *decidable* (dapat ditentukan kebenarannya dalam waktu yang terbatas)serta tidak menggunakan *qualifier* (pernyataan keseluruhan atau sebagian) termasuk dalam logika formula, aritmetika linear, serta fungsi yang tidak diinterpretasi (Vazou, 2016).

#### Penulisan Spesifikasi

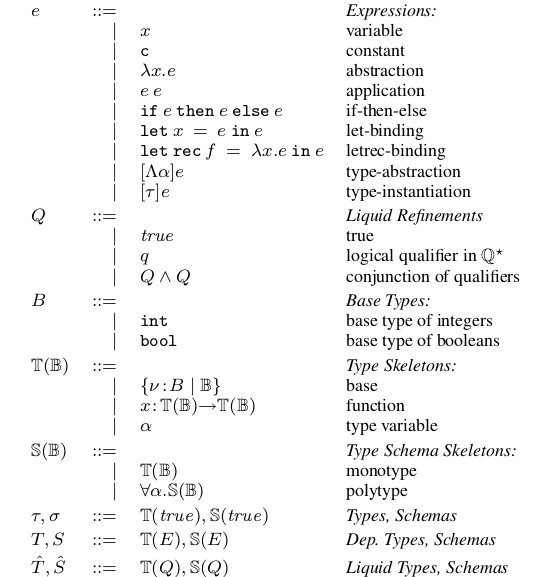
Liquid Haskell melakukan verifikasi dengan mengecek spesifikasi yang ditulis dengan bahasa khusus kemudian membandingkannya dengan fungsi yang berkaitan dengan spesifikasi tersebut. Spesifikasi dituliskan dengan menggunakan bahasa Haskell yang dimodifikasi.

Setiap spesifikasi dituliskan dalam blok komentar {-@ @-}. Blok komentar ini tidak akan dibaca oleh *compiler* Haskell sehingga penulisan spesifikasi ini tidak akan mengubah kompilasi program sama sekali. Namun, Liquid Haskell akan membaca blok-blok komentar itu saat proses verifikasi.

Spesifikasi dituliskan seperti *signature type* yang sudah biasa dituliskan untuk setiap fungsi dalam Haskell namun dengan tipe masing-masing yang diubah. Format penulisan tipe tersebut adalah

{nama variabel : tipe | kondisi}

Nama variabel bisa diisi apa pun dan akan menjadi nama variabel yang akan digunakan dalam penulisan kondisi. Nama variabel tersebut juga bisa direferensi oleh kondisi pada tipe-tipe selanjutnya dalam fungsi yang sama. Tipe merupakan tipe asli dari parameter tersebut. Kondisi adalah pembatasan yang dikenakan pada parameter tersebut. Jika parameter itu adalah masukan, maka kondisi bersifat sebagai *precondition*. Berarti, fungsi tersebut tidak akan menerima parameter tersebut kecuali jika parameter tersebut mematuhi kondisi yang dituliskan. Jika parameter itu adalah keluaran, maka kondisi bersifat sebagai *postcondition*. Kondisi ini menjamin bahwa keluaran program akan mengikuti kondisi yang sudah ditetapkan. Aturan sintaksis lengkap dari Liquid Haskell dapat dilihat pada Gambar II.1.



Gambar II.1. Sintaksis Liquid Haskell (Rondon et al., 2008)

Misalkan ada sebuah fungsi pembalik yang akan mengubah angka negatif menjadi angka positif dan tidak menerima angka 0. Maka fungsi tersebut bersama spesifikasinya akan berbentuk seperti berikut:

{-@ inverse :: {x:Int | x > 0} -> {v:Int | v < 0} @-}

inverse :: Int -> Int

inverse x = x \* (-1)

Spesifikasi pada fungsi ini membatasi sehingga fungsi inverse hanya menerima masukan dengan nilai lebih besar dari 0. Spesifikasi tersebut juga menjamin bahwa fungsi ini akan memberikan keluaran sebuah nilai yang lebih kecil dari 0.

Spesifikasi ini juga bisa digunakan dalam memberi batasan pada sebuah struktur data. Misalkan ada struktur data pohon biner berbentuk seperti ini:

data Tree a =

E

| T a (Tree a) (Tree a)

Pemrogram bisa menjamin bahwa nilai-nilai pada cabang pohon kiri lebih kecil daripada nilai pada simpul serta nilai-nilai pada cabang pohon kanan lebih besar daripada nilai pada simpul (properti BST) dengan menuliskan spesifikasi sebagai mana berikut:

{-@ data Tree a =

E

| T { key :: a

, lt :: Tree {v:a | v < key}

, rt :: Tree {v:a | v > key}

}

@-}

Dapat terlihat bahwa spesifikasi menjamin bahwa cabang pohon kiri atau lt memiliki nilai yang lebih kecil daripada nilai pada simpul akar atau key dan cabang pohon kanan memiliki atau rt memiliki nilai yang lebih besar daripada key.

##### Fungsi pembantu

Liquid Haskell mengizinkan penulisan beberapa fungsi pembantu untuk memudahkan penulisan spesifikasi. Ada dua jenis fungsi pembantu yang bisa dituliskan di antaranya adalah *measure* dan *inline*.

*Inline* merupakan fitur yang berfungsi seperti *alias* pada bahasa C. Fitur ini membantu penulis untuk menuliskan sebuah kondisi yang dibutuhkan berulang-ulang menjadi sebuah bentuk yang jauh lebih singkat dan mungkin lebih deskriptif. Misalkan suatu program membutuhkan pengecekan berulang-ulang bahwa sebuah angka merupakan bilangan genap positif. Dibandingkan menuliskan syarat yang agak panjang tersebut berulang-ulang, bisa dituliskan *inline* sebagaimana berikut:

{-@ inline isPositiveEven @-}

isPositiveEven :: Int -> Bool

isPositiveEven x = (x > 0) && (x `mod` 2 == 0)

Dengan menggunakan *inline* ini maka jika ada spesifikasi yang membutuhkan syarat ini maka spesifikasi tersebut bisa menuliskan isPositiveEven x dan bukan (x > 0) && (x `mod` 2 == 0) yang lebih panjang daripada *inline* tersebut.

*Measure* merupakan fitur untuk mengangkat sebuah fungsi yang pemrogram tulis sehingga menjadi salah satu fungsi yang bisa digunakan dalam spesifikasi. Namun ,tidak semua fungsi bisa digunakan sebagai *measure*. Ada banyak restriksi yang harus dipenuhi untuk menjadikan fungsi sebagai sebuah *measure*, salah satunya adalah fungsi tersebut harus hanya memiliki satu parameter (Vazou et al., 2014). Salah satu contoh fungsi *measure* adalah fungsi warna berikut ini:

{-@ measure color @-}

color :: RBSet a -> Color

color (T c \_ \_ \_) = c

color E = B

color EE = BB

Fungsi ini bisa membantu fungsi yang memiliki spesifikasi yang berkaitan dengan warna simpul akar dari sebuah pohon. Contoh penggunaan fungsi *measure* tersebut adalah seperti yang digunakan pada *precondition* fungsi redden berikut ini:

{-@ redden :: {x:RBSet a | color x == B} -> RBSet a @-}

redden :: RBSet a -> RBSet a

redden (T \_ x a b) = T R x a b

Fungsi color membantu penulisan *precondition* fungsi redden sehingga fungsi ini hanya menerima masukan pohon dengan simpul akar berwarna hitam. Hal ini akan sangat sulit dilakukan tanpa menggunakan *measure* tersebut.

Ada satu lagi fitur untuk menyingkat penulisan spesifikasi bernama *type*. Berbeda dengan *inline* yang dapat membantu menyingkat penulisan kondisi, *type* dalam mebantu menyingkat penulisan tipe. Contoh dari penulisan *type* adalah seperti berikut:

{-@ type TL a X = Tree {v:a | v < X} @-}

{-@ type TR a X = Tree {v:a | X < v} @-}

Penulisan *type* sebagai mana dituliskan pada contoh ini dapat membantu mempersingkat penulisan spesifikasi struktur data Tree yang sudah dituliskan sebelumnya menjadi seperti berikut:

{-@ data Tree a =

E

| T { key :: a

, lt :: TL a key

, rt :: TR a key

}

@-}

Seperti semua fitur penyingkat lainnya, fitur ini akan sangat membantu jika ada sebuah kondisi yang panjang yang dituliskan berulang-ulang sehingga proses penyingkatan akan sangat mengurangi usaha yang dibutuhkan untuk menuliskan spesifikasi.

##### Spesifikasi untuk Fungsi yang digunakan oleh Fungsi Lain

Fungsi-fungsi pada Haskell didesain untuk bisa beroperasi saling independen. Setiap fungsi bisa digunakan oleh pengguna tanpa perlu memedulikan apa pun tentang fungsi lain yang berada di *file* lain atau bahkan dalam *file* yang sama. Setiap fungsi juga dapat menggunakan fungsi lain sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan oleh fungsi tersebut. Namun, fungsi yang digunakan tersebut bisa saja mengalami perubahan secara independen yang membuat fungsi itu tidak cocok lagi digunakan untuk fungsi yang menggunakannya. Dengan kata lain, setiap fungsi memiliki sifat seperti kotak hitam terhadap fungsi lainnya yang tidak mengetahui apa yang sebenarnya dilakukan oleh fungsi yang digunakan tersebut. Fungsi pengguna hanya bisa mengharapkan bahwa fungsi yang digunakan mematuhi logika tertentu yang penting untuk digunakan oleh fungsi pengguna. Untuk itu, dituliskan spesifikasi khusus pada fungsi yang digunakan oleh fungsi lain untuk menjamin bahwa fungsi tersebut bisa digunakan oleh fungsi pengguna.

Kita dapat menggunakan fungsi inverse yang berada pada II.1.1.1 sebagai contoh. Dibuat sebuah fungsi sederhana operasiA x y = x \* 2 / (inverse y). Fungsi operasiA menggunakan operasi bagi (/) yang membutuhkan penyebut yang tidak bernilai 0. Jika fungsi inverse memiliki kemungkinan untuk menghasilkan nilai sama dengan 0, maka fungsi operasiA memiliki kemungkinan mendapatkan *error* *division by zero* yang berarti fungsi tersebut tidak konsisten. Untungnya, fungsi inverse sudah memiliki spesifikasi {-@ inverse :: {x:Int | x > 0} -> {v:Int | v < 0} @-} yang berarti keluaran dari fungsi ini dijamin memiliki nilai yang lebih kecil dari 0. Tidak ada nilai yang lebih kecil dari 0 memiliki nilai yang sama dengan 0, sehingga dengan ini fungsi operasiA dianggap konsisten. Namun tentu saja, dalam saat yang sama fungsi inverse memiliki *precondition* yang mensyaratkan bahwa fungsi ini mendapatkan masukan yang selalu lebih besar dari 0. Untuk itu, fungsi operasiA bisa diubah sehingga fungsi tersebut pasti akan memberikan nilai yang lebih besar dari 0 atau fungsi tersebut dapat juga memiliki spesifikasi yang mensyaratkan bahwa nilai yang diterima fungsi tersebut lebih besar dari 0. Contoh spesifikasi tersebut dapat ditulis sebagaimana berikut ini {-@ operasiA :: Int -> {y:Int | y > 0} -> Int @-}.

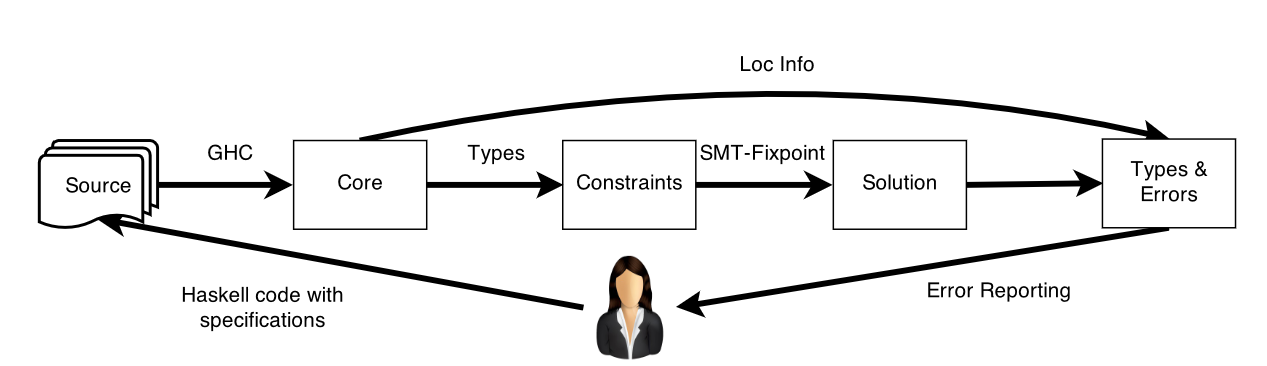
Jika fungsi operasiA kemudian dibutuhkan oleh fungsi lain yang mensyaratkan properti tertentu, maka spesifikasi ini bisa diubah sehingga spesifikasi ini akan mensyaratkan keluaran yang dibutuhkan tersebut. Tentu saja, fungsi ini harus tetap konsisten dan lulus dalam pengecekan konsistensi terhadap kondisi keluaran yang baru tersebut. Misalkan ada fungsi lain yang membutuhkan operasiA dan mensyaratkan bahwa hasil operasiA selalu genap. Maka spesifikasi bisa diubah sehingga menjadi {-@ operasiA :: Int -> {y:Int | y > 0} -> {v:Int | v % 2 == 0} @-}. Kemudian ada fungsi lain yang membutuhkan operasiA memiliki nilai yang lebih kecil dari 0. Spesifikasi operasiA dapat diubah menjadi {-@ operasiA :: Int -> {y:Int | y > 0} -> {v:Int | (v % 2 == 0) && (v > 0)} @-}. Namun spesifikasi ini tidak akan diterima oleh Liquid Haskell karena operasiA belum tentu menghasilkan nilai yang hanya positif. Oleh karena itu, berarti terjadi inkonsistensi dalam program yang harus dicek kembali

#### Verifikasi Program

Verifikasi program dilakukan dengan menjalankan program Liquid Haskell yang sudah terinstalasi dan memberikan nama dan lokasi *file* yang akan diverifikasi sebagai argumen. Program akan memberikan hasil berupa SAFE jika program tersebut lolos verifikasi ataupun UNSAFE beserta dengan deskripsi letak kesalahan program jika program tersebut gagal dalam verifikasi.

### Alur Kerja Liquid Haskell

Cara kerja Liquid Haskell secara sederhana telah dirangkum pada Gambar II.2.



Gambar II.2. Liquid Haskell *Workflow* (Vazou et al., 2014)

#### Program yang diverifikasi (*Source*)

Liquid Haskell dapat menerima *file* yang berisi program Haskell biasa. Program tersebut juga dapat ditambahkan dengan spesifikasi yang sudah dituliskan dalam format yang dikenali oleh Liquid Haskell. Spesifikasi tersebut juga dapat dituliskan dalam *file* terpisah. Jika spesifikasi tersebut dituliskan bersamaan dengan kode program, maka spesifikasi tersebut dituliskan dalam blok komentar {-@ @-} sehingga spesifikasi tersebut tidak akan mengganggu kompilasi program menjadi program Haskell biasa dengan menggunakan kompilator Haskell yang lain.

#### Bahasa Perantara *Core*

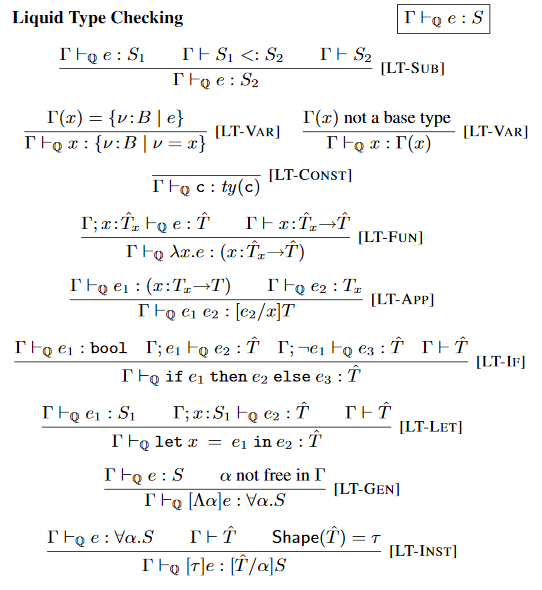
*Core* adalah sebuah bahasa perantara yang digunakan oleh GHC (*Glorious Haskell* Compiler) untuk menyatukan berbagai implementasi bahasa Haskell yang bermacam-macam menjadi sebuah bahasa yang padu dan singkat serta mudah untuk dikompilasi. Penggunaan bahasa *Core* juga memudahkan pembuatan Liquid Haskell karena bahasa *Core* didesain untuk memudahkan pengecekan tipe yang digunakan oleh kode sehingga dengan menggunakan bahasa *Core* setengah pengecekan tipe yang harus dilakukan oleh Liquid Haskell sudah bisa dikerjakan oleh GHC secara langsung. Oleh karena itu, Liquid Haskell memanfaatkan GHC untuk terlebih dahulu mengonversi kode Haskell yang diterima menjadi kode dalam bahasa *Core* sebelum diproses lebih lanjut oleh Liquid Haskell sendiri. Keuntungan lain dari proses ini adalah dalam proses ini GHC juga mampu mengeliminasi program yang bukan merupakan program Haskell yang valid misalnya karena ada salah ketik dalam program sehingga kode yang akan ditangani oleh Liquid Haskell pasti merupakan kode yang sudah bisa dikompilasi menjadi sebuah program.

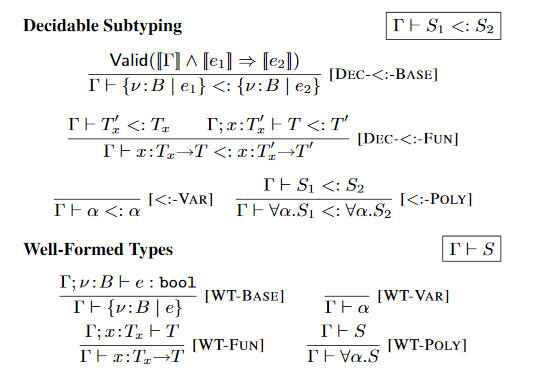
#### Kalimat Logika sebagai Batasan (*Constraints*)

Pada tahap ini *constraints* atau batasan diberikan kepada berbagai variabel yang digunakan dalam kode *Core* dalam bentuk *Liquid Types*. Batasan-batasan ini didesain untuk mampu untuk menerangkan karakteristik program dengan menggunakan jumlah kalimat logika yang sesedikit mungkin. Misalnya, untuk kode y = if x > 0 then x else 1, salah satu batasan yang bisa diberikan adalah kalimat logika yang menyatakan bahwa y pasti memiliki nilai lebih dari 0.

*Liquid Types* memiliki format {nama variabel: tipe | kondisi}. Nama variabel bisa diisi apa pun dan akan menjadi nama variabel yang akan digunakan dalam penulisan kondisi. Nama variabel tersebut juga bisa direferensi oleh kondisi pada tipe-tipe selanjutnya dalam fungsi yang sama. Tipe merupakan tipe asli dari parameter tersebut. Kondisi adalah pembatasan yang dikenakan pada parameter tersebut. Jadi, misal dari kode y = if x > 0 then x else 1 yang sudah disebutkan sebelumnya dapat didapatkan sebuah batasan {y: Int | y > 0}. Contoh lain adalah kode sederhana bagi x y = x / y yang dari kode tersebut dapat diambil batasan {y: Int | y /= 0} karena operasi pembagian tidak boleh memiliki penyebut yang bernilai sama dengan nol. Spesifikasi yang dituliskan dalam kode Haskell merupakan serangkaian kalimat logika yang sudah ditulis dalam format *Liquid Types* yang bisa ditambahkan pada serangkaian *Liquid Types* yang sudah disarikan dari program itu sendiri untuk membantu pembuktian atau menambahkan pengujian konsistensi program terhadap hal tertentu yang diinginkan oleh pengguna.

Sistem dasar dan aturan dari *Liquid Types* dapat dilihat pada Gambar II.3. Aturan ini ditetapkan untuk memastikan bahwa kalimat logika yang dihasilkan mampu diselesaikan oleh *SMT Solver* pada akhirnya (kalimat logika tidak *undecidable*) serta mampu menerangkan berbagai karakteristik dari program seperti percabangan, *polymorphism*, serta pengecekan *subtype* dalam program secara benar (Rondon et al., 2008). Kemudian aturan tersebut akan digunakan untuk memproduksi berbagai *Liquid Types* yang sesuai dengan suatu program dalam algoritma yang ditunjukkan pada Gambar II.4.

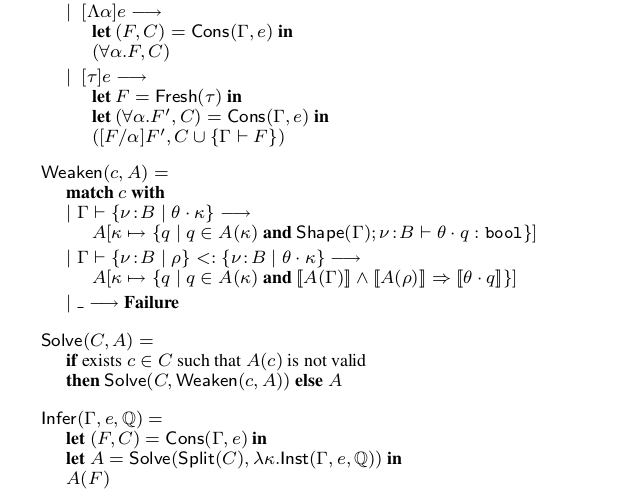
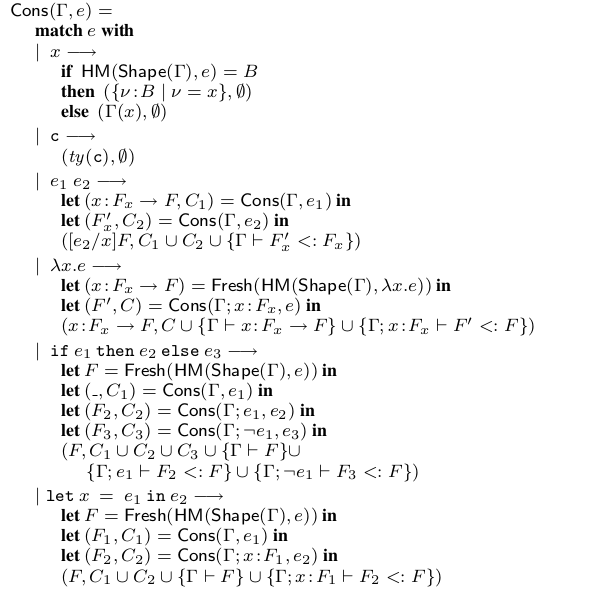




Gambar II.3. Aturan Pengecekan *Liquid Type* (Rondon et al., 2008)

#### Solusi dan Hasil (*Solution, Types, and Errors*)

Pada akhirnya seluruh batasan yang dihasilkan dari tahap sebelumnya disatukan menjadi *Horn Clause* atau kalimat logika dalam bentuk u ← (p ∧ q ∧ ... ∧ t) yang kemudian akan diselesaikan oleh algoritma *fixpoint* yang diterangkan dalam Gambar II.4. Fungsi solve pada algoritma tersebut bisa diimplementasikan dengan menggunakan bantuan *SMT Solver* seperti Z3 atau CVC4.



Gambar II.4. Algoritma *Liquid Type Inference* (Rondon et al., 2008)

Setelah menjalankan algoritma ini, akan dihasilkan inferensi apakah rangkaian batasan yang sudah dihasilkan dari sebuah kode mampu diselesaikan atau tidak. Jika ya, maka Liquid Haskell akan memberikan hasil “SAFE” yang menandakan bahwa kode program telah berhasil diverifikasi dan memiliki logika yang konsisten. Jika tidak, maka Liquid Haskell akan memberikan hasil “UNSAFE” dan menunjukkan batasan yang mana yang tidak sesuai dengan batasan yang lain serta lokasi kode program yang menghasilkan batasan tersebut untuk penanganan selanjutnya.

## Pohon Merah-Hitam

Struktur data Pohon Merah-Hitam atau *Red-Black Tree* (RBT) adalah sebuah algoritma yang diciptakan oleh Rudolf Bayer pada 1972 (Bayer, 1972) yang bertujuan untuk membuat struktur data *B-Tree* yang selalu memiliki keseimbangan antara cabang kiri dan kanan. Struktur data ini memungkinkan penambahan, penghapusan, ataupun modifikasi data yang selalu efisien dengan kompleksitas algoritma sebesar O(log n) dengan n adalah jumlah noda dalam pohon. Namun struktur data ini merupakan sebuah struktur data *B-Tree* yang merupakan sebuah pohon yang memungkinkan adanya lebih dari satu angka dalam satu noda atau disebut juga pohon 2-3-4 . Struktur data ini membutuhkan berbagai operasi kompleks yang sulit untuk diimplementasikan di kebanyakan bahasa pemrograman. Karena itu, implementasi selanjutnya dari struktur data ini dituliskan menggunakan struktur data *Binary Search Tree* yang membuat implementasi menjadi lebih sederhana dari sebelumnya (Sedgewick, 2008).

Pohon Merah-Hitam digunakan dalam beberapa aplikasi diantaranya adalah implementasi fungsi *TreeSet, TreeMap,* dan *HashMap* pada *Java Collections Library* (Krimgen, 2020). Linux juga menggunakan struktur data ini untuk operasi *mmap* dan *mummap* pada sistem *file*. Selain itu fungsi ini juga digunakan pada berbagai bidang lain seperti *k-means clustering*, *geometric range searching,* serta *text-mining.* Strukur data ini umumnya tidak diimplementasikan untuk fungsi yang digunakan langsung oleh pemrogram namun digunakan untuk beberapa fungsi yang lebih tidak terlihat dalam sebuah operasi.

Pada 1999, Chris Okasaki menunjukkan teknik untuk melakukan penambahan noda pada struktur data tersebut secara fungsional murni (Okasaki, 1999). Hal ini memungkinkan struktur data tersebut untuk diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman fungsional murni. Algoritma tersebut merupakan algoritma yang elegan dan sederhana yang menjadi algoritma yang populer untuk digunakan untuk mengimplementasikan struktur data ini (Germane & Might, 2014). Meskipun Okasaki sudah mengimplementasikan penambahan noda pada Red-Black Tree, dia tidak menjelaskan teknik untuk menghapus noda dari struktur data tersebut sehingga dibutuhkan algoritma tambahan yang juga elegan dan sederhana untuk melengkapi implementasi struktur data Red-Black Tree.

Berangkat dari kebutuhan tersebut, Matthew Might berupaya untuk menuliskan algoritma yang elegan untuk melakukan penghapusan noda pada Red-Black Tree. Untuk melakukan hal tersebut, Might menambahkan warna baru pada struktur data tersebut yaitu *Double Black* dan *Negative Black* untuk membuat implementasi menjadi lebih elegan dari pada percobaan implementasi algoritma sebelumnya. Meskipun algoritma ini lebih lambat daripada algoritma sebelumnya yang dituliskan oleh Kahrs, kesederhanaan dari algoritma yang dituliskan oleh Might diklaim bisa memudahkan penulisan program yang pada akhirnya bisa dimodifikasi untuk meningkatkan kemampuan sesuai kebutuhan (Germane & Might, 2014).

### Objek-Objek Teori Graf

Graf adalah sebuah kumpulan simpul-simpul (*node*) yang dihubungkan oleh sisi (*edge*). Pohon adalah sebuah graf sedemikian sehingga semua simpul hanya dihubungkan oleh maksimal satu lintasan. Graf berarah adalah sebuah graf yang memiliki sisi-sisi yang memiliki arah. Pada pohon, untuk setiap sisi yang berarah, maka simpul yang menjadi sumber dinamakan simpul ayah (*parent node*) dan simpul yang menjadi tujuan dinamakan simpul anak (*child node*). Simpul yang tidak memiliki simpul ayah dinamakan simpul leluhur (*ancestor node*) atau akar (*root*). Simpul yang tidak memiliki simpul anak dinamakan daun (*leaf*). Pohon biner adalah sebuah pohon sedemikian sehingga seluruh simpul hanya maksimal memiliki 1 simpul ayah dan 2 simpul anak.

### Pohon Pencarian Biner

Pohon Pencarian Biner atau *Binary Search Tree* (BST) adalah sebuah Pohon Biner yang memiliki untuk setiap simpul maka simpul tersebut memiliki nilai yang lebih besar daripada seluruh nilai pada cabang di sebelah kiri dan lebih kecil dari pada seluruh nilai pada cabang di sebelah kanan. Struktur data ini memiliki sifat bahwa operasi pencarian pada pohon ini bisa dilakukan dengan sangat efisien dengan kompleksitas rata-rata sebesar hanya O(log n).

Kekurangan dari struktur data ini adalah pada struktur data ini mungkin saja salah satu cabang dari pohon jauh lebih panjang dari pada cabang yang lain sehingga program yang mencari sebuah simpul dalam cabang yang panjang itu akan membutuhkan waktu yang lebih lama dari seharusnya. Contohnya, dalam Gambar II.5, program yang akan mencari simpul “1” akan membutuhkan waktu yang lebih lama daripada program yang akan mencari simpul “11”.

Gambar II.5. Contoh Pohon Pencarian Biner.

Untuk mengatasi masalah ini, cabang-cabang pohon ini harus dijaga agar seimbang sehingga setiap simpul dalam pohon akan bisa dicari dalam waktu yang sama dan konsisten. Ada beberapa algoritma yang mampu melakukan hal ini salah satunya adalah algoritma dalam Pohon Merah-Hitam yang secara otomatis melakukan penyeimbangan setelah setiap operasi.

### Pohon Merah-Hitam

Pohon Merah-Hitam atau *Red-Black Tree* (RBT) adalah sebuah Pohon Pencarian Biner khusus yang didesain sehingga setiap cabang dari pohon selalu seimbang. Pada RBT, beberapa simpul memiliki warna merah atau hitam. Seluruh RBT harus mematuhi beberapa properti atau disebut juga *invariant* yaitu:

1. Properti BST; seluruh nilai pada simpul kiri dan anak-anaknya harus lebih kecil daripada nilai pada simpul ayah serta seluruh nilai pada simpul kanan dan anak-anaknya harus lebih besar daripada nilai pada simpul ayah.
2. Properti Warna; Simpul anak dari simpul berwarna merah harus memiliki warna hitam.
3. Properti Tinggi; Seluruh jalur dari akar menuju daun harus memiliki jumlah simpul hitam yang sama.

Beberapa literatur menambahkan beberapa properti lain yang harus dipatuhi oleh RBT namun properti-properti ini bisa tidak dipatuhi oleh implementasi tertentu karena tidak mengubah struktur data secara signifikan.

1. Akar harus memiliki warna hitam. Seluruh akar berwarna merah pada RBT yang sudah mematuhi properti sebelumnya bisa diubah menjadi warna hitam tanpa melanggar properti lain sehingga properti ini tidak mengubah apa-apa
2. Seluruh daun harus memiliki warna hitam. Properti ini bisa dipenuhi dengan mengubah RBT yang sudah ada dengan menambahkan dua simpul berwarna hitam pada semua daun pada RBT sehingga properti ini bisa langsung dipenuhi oleh RBT yang sudah memiliki properti-properti sebelumnya.

RBT yang mematuhi seluruh properti tersebut akan selalu memiliki keseimbangan sehingga seluruh operasi pencarian pasti memiliki kompleksitas algoritma maksimal sebesar O(log n) karena cabang dengan tinggi terpanjang yang mungkin, dengan warna merah dan hitam yang berselang-seling, hanya maksimal memiliki tinggi dua kali lipat cabang yang banyak memiliki simpul berwarna hitam (Okasaki, 1999). Sebagai contoh, Gambar II.6 menunjukkan Gambar II.5 yang sudah diubah untuk mematuhi properti-properti RBT. Pada pohon ini, program yang sedang mencari simpul “1” akan membutuhkan waktu yang sama dengan program yang sedang mencari simpul “11”. Seluruh jalur dari akar ke daun pada pohon ini memiliki jumlah simpul berwarna hitam yang sama yaitu sebesar 2.

Gambar II.6. Gambar II.5 yang diubah menjadi RBT.

### Algoritma penambahan Okasaki

Algoritma penambahan pada BST biasa sangat mudah. Penambahan bisa dilakukan hanya dengan mencari daun yang memiliki nilai yang paling dekat dengan nilai yang akan dimasukkan kemudian tambahkan nilai tersebut sebagai simpul anak dari simpul tersebut di kiri atau di kanan tergantung apakah nilai yang akan dimasukkan lebih besar atau lebih kecil dari nilai tersebut. Algoritma penambahan untuk BST biasa terlihat seperti ini:

insert :: Ord elt => elt -> Set elt -> Set elt

insert E = T E x E

insert (T a y b)

| x < y = T (insert a) y b

| x == y = T a y b

| x > y = T a y (insert b)

Algoritma penambahan RBT Okasaki tidak jauh berbeda dengan algoritma penambahan BST. Pada algoritma tersebut ditambahkan modifikasi untuk memperhatikan warna dari simpul pada RBT serta sebuat fungsi penyeimbang (*balance*) untuk menjaga properti warna RBT. Algoritma penambahan Okasaki terlihat seperti ini:

insert :: Ord elt => elt -> Set elt -> Set elt

insert x s = makeBlack (ins s)

where

ins E = T R E x E

ins (T color a y b)

| x < y = balance color (ins a) y b

| x == y = T color a y b

| x > y = balance color a y (ins b)

makeBlack (T \_ a y b) = T B a y b

Modifikasi dari fungsi penambahan BST salah satunya adalah penambahan fungsi makeBlack untuk membuat simpul akar selalu berwarna hitam. Juga dipastikan bahwa simpul daun yang akan ditambahkan akan memiliki warna merah. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa properti tinggi pasti akan tetap terpenuhi karena simpul merah tidak akan mengubah jumlah simpul hitam pada jalur mana pun. Kemudian untuk menjaga properti warna, ditambahkan fungsi balance untuk melihat cabang yang berkemungkinan melanggar properti warna dan kemudian menyeimbangkannya.

Ada 4 kasus yang membuat pohon hasil penambahan melanggar properti warna. Keempat kasus itu bisa dilihat pada Gambar II.7. Kasus-kasus ini mungkin terjadi ketika sebuah simpul daun berwarna merah ditambahkan sebagai simpul anak pada sebuah simpul berwarna merah.

Gambar II.7. Empat kasus pelanggaran properti warna

Algoritma Okasaki mengubah seluruh pohon ini menjadi sebuah pohon yang berbentuk seperti dapat dilihat pada Gambar II.8. Pohon ini akan memenuhi seluruh properti RBT baik properti BST, properti tinggi, maupun properti warna (Okasaki, 1999).

Gambar II.8. Pohon hasil penyeimbangan

Pada bahasa pemrograman fungsional, fungsi penyeimbang ini bisa ditulis dengan sangat mudah dalam bentuk sebagai berikut:

balance B(T R (T R a x b) y c)z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B(T R a x (T R b y c))z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x (T R(T R b y c)z d) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x(T R b y(T R c z d)) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance color a x b = T color a x b

Algoritma ini akan menghasilkan simpul berwarna merah pada simpul paling atas yang bisa saja memiliki simpul ayah berwarna merah. Untuk itu jika simpul tersebut memiliki simpul kakek (simpul ayah dari simpul ayah) berwarna hitam maka algoritma ini bisa kembali dijalankan terhadap simpul kakek tersebut untuk menyeimbangkannya. Jika simpul ayah tersebut merupakan simpul akar, maka simpul tersebut bisa diberi warna hitam dan kemudian seluruh pohon akan menjadi RBT yang valid.

### Algoritma penghapusan Matt Might

Meskipun Okasaki sudah membuat algoritma penambahan yang elegan, dia tidak membuat algoritma penghapusan untuk melengkapinya. Ada beberapa upaya untuk melengkapi algoritma penghapusan tersebut salah satunya adalah algoritma yang dibuat oleh Kahrs (Kahrs, 2001) namun Matthew Might menganggap bahwa kode tersebut terlalu kompleks sehingga kode tersebut sulit untuk diimplementasikan pada bahasa selain Haskell (Might, 2010). Oleh karena itu, Might berupaya untuk membuat sebuah algoritma penghapusan yang sama elegannya dengan algoritma penambahan yang dibuat oleh Okasaki.

Salah satu alasan mudahnya pembuatan algoritma penambahan RBT adalah simpul yang ditambahkan akan selalu menjadi simpul daun sehingga keutuhan properti bisa dengan mudah dijaga. Namun, pada saat penghapusan, bisa saja terjadi penghapusan dilakukan terhadap simpul yang berada jauh di dalam pohon sehingga algoritma yang akan melakukan penghapusan harus memikirkan cara untuk memodifikasi pohon setelah penghapusan namun tetap menjaga seluruh properti RBT pada pohon.

Prosedur penghapusan sebuah simpul akan berbeda tergantung dengan jumlah simpul anak yang simpul itu miliki. Jika simpul itu memiliki dua simpul anak, maka penghapusan dilakukan dengan menghapus salah satu simpul dari cabang sebelah kiri yang memiliki nilai paling tinggi, kemudian mengganti nilai dari simpul target dengan nilai simpul yang baru saja dihapus. Jika simpul tersebut memiliki satu simpul anak, hanya ada satu simpul yang mungkin memiliki satu simpul anak, yaitu sebuah simpul berwarna hitam yang memiliki simpul berwarna merah. Untuk kasus itu, maka prosedur penghapusan adalah kembali untuk menghapus simpul anak tersebut dan kemudian mengganti nilai simpul target menjadi nilai simpul yang baru saja dihapus. Untuk sebuah simpul daun berwarna merah, simpul bisa langsung dihapus tanpa mengganggu properti apa pun.

Satu kasus yang akan berpotensi merusak properti tinggi adalah jika simpul yang akan dihapus adalah sebuah simpul daun berwarna hitam. Jika simpul ini dihapus, maka salah satu jalur dari akar ke daun akan memiliki jumlah simpul hitam yang berkurang satu sehingga seluruh jalur lain harus dimodifikasi untuk mengakomodasi penghapusan tersebut. Hal ini mungkin akan menjadi sebuah operasi yang sulit karena keseluruhan pohon harus diubah untuk kembali mematuhi properti tinggi tersebut.

Might menyelesaikan masalah ini dengan menambahkan dua warna pada struktur data RBT yaitu *Double Black* (BB) dan *Negative Black* (NB). Simpul dengan warna BB akan dihitung sebagai 2 simpul hitam untuk kalkulasi properti tinggi. Sebaliknya, simpul dengan warna NB akan dihitung sebagai -1 untuk kalkulasi tersebut. Untuk menyelesaikan masalah penghapusan simpul daun hitam, maka setelah penghapusan tersebut maka warna dari simpul ayah dari simpul tersebut akan ditambahkan warna hitam. Jadi, jika simpul tersebut sebelumnya berwarna merah, maka simpul tersebut akan menjadi berwarna hitam. Jika sebelumnya simpul tersebut memiliki warna hitam, maka simpul tersebut akan menjadi berwarna BB. Dengan demikian, properti tinggi akan kembali terpelihara setelah terjadi penghapusan dalam RBT ini. Kode untuk prosedur penghapusan ini akan berbentuk seperti ini:

remove :: RBSet a -> RBSet a

-- ; Penghapusan daun

remove (T R E \_ E) = E

remove (T B E \_ E) = EE

-- ; Penghapusan simpul dengan satu anak

remove (T B E \_ (T R a x b)) = T B a x b

remove (T B (T R a x b) \_ E) = T B a x b

-- ; Penghapusan simpul dengan dua anak

remove (T color l y r) = bubble color ll mx r

where mx = max l

ll = removeMax l

removeMax :: RBSet a -> RBSet a

removeMax s@(T \_ \_ \_ E) = remove s

removeMax s@(T color l x r) = bubble color l x (removeMax r)

Fungsi max adalah fungsi yang mendapatkan nilai maksimum yang berada pada suatu pohon. Fungsi removeMax adalah fungsi yang melakukan prosedur penghapusan kepada simpul yang memiliki nilai paling besar pada suatu pohon.

Operasi ini akan meninggalkan sebuah simpul berwarna bukan merah dan bukan hitam dalam pohon. Karena itu, maka pohon ini masih harus dimodifikasi untuk menghilangkan warna BB tersebut. Langkah pertama untuk menghilangkan warna ini adalah dengan melakukan operasi bernama *Bubble* (gelembung) yang berusaha mengangkat warna BB tersebut naik sampai ke simpul akar atau menghilangkan warna itu sama sekali jika memungkinkan. Ada 6 pohon yang mungkin memiliki simpul berwarna BB seperti dapat dilihat dalam Gambar II.9.

Gambar II.9. Enam pohon yang memiliki simpul berwarna BB

Fungsi *bubble* akan mengangkat atau menghilangkan warna BB pada pohon tersebut sehingga menjadi seperti terlihat pada Gambar II.10.

Gambar II.10. Hasil operasi fungsi *bubble*

Simpul X dan Z menandakan simpul yang mungkin memiliki pelanggaran properti warna sehingga harus dijalankan fungsi penyeimbang khusus untuk simpul-simpul tersebut. Pada dasarnya, fungsi *bubble* hanya mengurangi warna hitam dari seluruh simpul anak dan kemudian menambah warna hitam pada simpul ayah. Karena itu, fungsi ini memiliki kode yang sangat pendek.

bubble :: Color -> a -> RBSet a -> RBSet a -> RBSet a

bubble color x l r

| isBB(l) || isBB(r) = balance (blacker color) x (redder' l) (redder' r)

| otherwise = balance color x l r

Fungsi isBB adalah fungsi yang mendeteksi apakah suatu simpul memiliki warna BB atau tidak. Jika tidak ada simpul anak yang memiliki warna BB, maka fungsi *bubble* bisa langsung dilewati dan program akan melakukan prosedur penyeimbangan.

Untuk proses penyeimbangan, seluruh simpul berwarna merah dan hitam bisa diseimbangkan dengan algoritma yang sama seperti yang telah ditulis oleh Okasaki terutama seperti pada kasus-kasus yang ditunjukkan pada Gambar II.7. Untuk pohon-pohon dengan warna BB dan NB, harus ditambahkan beberapa kode untuk menangani kasus tersebut. Salah satu kasus adalah kasus yang sama persis seperti yang ditunjukkan pada Gambar II.7, namun dengan simpul akar berwarna BB. Untuk kasus tersebut, maka pohon tersebut akan diseimbangkan sehingga menjadi pohon-pohon pada Gambar II.8, namun dengan simpul akar berwarna hitam dan bukan merah. Kemudian ada satu kasus khusus yang memiliki pohon berwarna BB dan NB sekaligus sebagaimana ditunjukkan pada Gambar II.11 dengan simpul z berwarna BB, simpul x berwarna NB, simpul b, w, dan y berwarna hitam, dan simpul a, c, dan d berwarna merah atau hitam.

Gambar II.11. Pohon dengan simpul berwarna BB dan NB

Pohon-pohon ini akan diseimbangkan menjadi dua pohon yang serupa seperti dapat dilihat pada Gambar II.12. Pohon ini masih memiliki potensi pelanggaran properti warna pada simpul X dan Z namun hal itu bisa diselesaikan dengan melakukan algoritma penyeimbang hanya sekali pada simpul X dan Z tersebut dan kemudian pohon ini akan menjadi RBT yang valid (Might, 2010) karena prosedur penyeimbangan yang dilakukan terhadap pohon yang tidak memiliki warna BB dan NB akan merupakan prosedur yang sama dengan prosedur penyeimbangan Okasaki yang tidak akan memanggil fungsi apa-apa lagi.

Gambar II.12. Pohon hasil penyeimbangan

Fungsi penyeimbang yang sudah ditambahkan kode-kode untuk menangani warna BB dan NB terlihat seperti ini:

balance :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a

-- Kasus-kasus Okasaki:

balance B(T R (T R a x b) y c) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B(T R a x (T R b y c)) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x(T R (T R b y c) z d) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x(T R b y (T R c z d)) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

-- 6 kasus penghapusan Might:

balance BB(T R(T R a x b) y c) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB(T R a x(T R b y c)) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T R(T R b y c)z d) = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x(T R b y(T R c z d)) = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T NB (T B b y c) z d@(T B \_ \_ \_))

= T B (T B a x b) y (balance B c z (redden d))

balance BB (T NB a@(T B \_ \_ \_) x (T B b y c)) z d

= T B (balance B (redden a) x b) y (T B c z d)

balance color a x b = T color a x b

Fungsi redden adalah fungsi yang mengubah simpul berwarna hitam menjadi simpul berwarna merah. Hal ini dilakukan untuk menjaga jumlah simpul hitam untuk perhitungan properti tinggi tanpa perlu mengubah warna dari simpul lain

Kemudian pada akhirnya kode dari fungsi penghapusan tidak jauh berbeda dengan kode dari fungsi penambahan.

delete :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

delete x s = makeBlack (del x s)

where

del x E = E

del x s@(T color aa y bb)

| x < y = bubble color (del x aa) y bb

| x > y = bubble color aa y (del x bb)

| otherwise = remove s

makeBlack (T \_ a y b) = T B a y b

makeBlack EE = E

## Implementasi Pohon Merah-Hitam dan Verifikasi

### Implementasi RBT Might dalam Bahasa Haskell

Might (Might, 2010) menuliskan bahwa dia membuat implementasi program yang dia tulis dengan menggunakan bahasa Racket. Kemudian, dia menulis ulang program tersebut dalam bahasa Haskell sembari menambahkan beberapa kode dalam *file* lain untuk melakukan verifikasi dengan bantuan *library* QuickCheck. Kemudian, Weirich (Weirich, 2014) mengimplementasikan kembali algoritma tersebut dengan sistem tipe yang jauh lebih ketat dengan menggunakan GADT. Dalam tempat yang sama, Weirich juga menggabungkan kode Haskell asli Might dan kode verifikasi QuickCheck dalam satu *file* dan menambahkan beberapa modifikasi yang membuat kode menjadi sedikit lebih mudah dipahami. Menurut penulis, kode versi ini adalah kode yang paling baik untuk menjadi kode target verifikasi karena kode ini merupakan kode yang paling memudahkan seorang untuk melakukan verifikasi langsung di satu tempat serta memiliki beberapa fungsi tambahan yang bisa membantu dalam memahami maksud penulisan program. Kode ini juga memiliki beberapa ekuivalensi dengan kode GADT yang ditulis Weirich sehingga seseorang bisa mendapat petunjuk tambahan atas apa yang program tersebut lakukan dengan melihat juga kode GADT yang sudah diimplementasikan. Sumber kode tersebut dapat dilihat pada <https://github.com/sweirich/dth/blob/master/examples/red-black/MightRedBlack.hs> dan sudah terlampirkan dalam Lampiran A.

### Usaha Verifikasi Sebelumnya terhadap Program

Implementasi RBT dalam bahasa Haskell oleh Might sudah memiliki paling sedikit 2 usaha verifikasi terhadap kode tersebut. Beberapa metode yang digunakan di antaranya adalah dengan menggunakan QuickCheck dan dengan menggunakan GADT.

#### Verifikasi QuickCheck

Verifikasi QuickCheck ini dilakukan oleh Might sendiri terhadap programnya. Detail verifikasi ini dituliskan oleh Might dalam artikel terpisah (Might, 2014). QuickCheck bekerja dengan membandingkan sebuah struktur data yang memiliki elemen yang diacak (*randomized*) dengan fungsi tertentu yang menghasilkan nilai *True* atau *False*. Kemudian QuickCheck akan menghitung jumlah nilai *True* terhadap nilai *False* dan memberikan hasilnya dalam bentuk persentase. Program yang memenuhi semua properti diharapkan akan mendapatkan nilai tidak kurang dari 100%. Setiap fungsi pembanding tersebut adalah representasi dari properti yang ingin dicek terhadap program.

Beberapa properti yang diverifikasi dalam eksperimen ini adalah:

1. Pohon harus memiliki elemen yang terurut (prop\_BST).
2. Pohon harus memiliki simpul akar yang berwarna hitam setelah setiap operasi (prop\_Rb2)
3. Banyak simpul berwarna hitam untuk setiap jalur dari simpul akar ke daun harus berjumlah sama (prop\_Rb3). Dengan kata lain, properti ini mengecek Properti Tinggi yang sudah disebutkan pada II.2.3.
4. Setiap simpul merah harus memiliki simpul anak berwarna hitam (prop\_Rb4). Properti ini disebut juga Properti Warna.
5. Jika sebuah elemen dihapus dari pohon, maka pohon hasil operasi tidak boleh memiliki elemen tersebut (prop\_delete\_spec1).
6. Seluruh elemen selain dari elemen yang dihapus harus tetap berada dalam pohon setelah operasi penghapusan (prop\_delete\_spec2).
7. Jika elemen yang akan dihapus tidak ada dalam pohon, maka pohon yang dihasilkan harus sama dengan pohon yang menjadi masukan (prop\_delete\_spec3).
8. Pohon hasil operasi penghapusan tetap mematuhi prop\_BST atau dengan kata lain elemennya tetap terurut (prop\_delete\_BST).
9. Pohon hasil operasi penghapusan tetap mematuhi prop\_Rb2, prop\_Rb3, dan prop\_Rb4 (prop\_delete2, prop\_delete3, prop\_delete4).

Menurut verifikasi yang dilakukan oleh Might dan bisa dilakukan oleh siapapun yang memiliki program yang berada dalam artikel tersebut serta memiliki QuickCheck yang sudah terinstalasi, program ini berhasil lolos dari seluruh tes yang diberikan.

Salah satu kelebihan penggunaan verifikasi QuickCheck adalah kecepatan dan kemudahan dalam menggunakannya. Seseorang yang ingin melakukan verifikasi terhadap sebuah struktur data cukup menyediakan properti yang ingin dicek dalam bentuk sebuah fungsi yang menerima masukan struktur data tersebut dan kemudian memberikan keluaran berupa *Boolean* atau *Property*, sebuah tipe yang khusus disediakan oleh QuickCheck untuk verifikasi lebih lanjut. Pengguna juga harus menyediakan sebuah metode khusus untuk melakukan pengacakan terhadap struktur data untuk menjadi sampel yang baik untuk verifikasi.

Namun karena sifat QuickCheck yang bergantung pada sistem pengacakan tersebut, masih ada kemungkinan bahwa QuickCheck tidak mendeteksi kesalahan karena sampel struktur data hasil pengecekan tidak representatif dan kehilangan sebuah *outlier* yang ternyata tidak memenuhi properti yang dites. Namun untuk dibandingkan dengan waktu dan biaya yang sangat murah yang harus dilakukan untuk melakukan verifikasi ini, maka seseorang yang ingin melakukan verifikasi mungkin bisa mempertimbangkan untuk menggunakan metode ini terlebih dahulu untuk menangkap kesalahan-kesalahan yang umum dan jelas sebelum melakukan verifikasi selanjutnya yang lebih menyeluruh.

#### Verifikasi GADT

Pada 2014 terinspirasi oleh struktur data yang sudah dibuat oleh Might, Weiritch menulis ulang program RBT tersebut namun dengan menggunakan sebuah fitur Haskell bernama *Generalized Algebraic Data Type* (GADT) untuk melakukan verifikasi tepat saat penulisan program (Weirich, 2014). Fitur ini memungkinkan pemrogram untuk menuliskan struktur data dengan cara tertentu sehingga jika pengguna lain ingin menggunakan struktur data tersebut dengan cara yang salah, maka program yang ditulis tidak akan bisa berjalan, bahkan tidak akan bisa dikompilasi. Fitur ini biasanya digunakan untuk aplikasi *domain-specific* yang mungkin memiliki konvensi penulisan yang unik sehingga pengguna tidak boleh menuliskan aplikasi struktur data pada aplikasi tersebut yang tidak sesuai dengan konvensi yang sudah ditetapkan.

Implementasi RBT secara GADT milik Weirich (Weirich, 2014) memiliki empat tipe pohon. Keempat tipe tersebut adalah:

1. RBSet; Tipe ini menandakan RBT yang valid
2. CT (*Constructed Tree*); Tipe ini menandakan RBT yang melanggar properti yang mengharuskan simpul akar memiliki warna hitam.
3. IR (*Intermediate*); Tipe ini menandakan RBT yang memiliki simpul akar yang mungkin melanggar properti warna.
4. DT (*Deletion Tree*); Tipe ini menandakan RBT yang mungkin memiliki warna BB atau NB pada simpul daun atau akar. Tipe ini ekuivalen dengan tipe IR yang ditambahkan keterangan bahwa simpul daun dan akar mungkin memiliki simpul berwarna BB dan NB,

Dengan pembatasan yang dilakukan oleh tipe ini, maka jika ada sebuah fungsi yang memiliki *signature* RBSet -> RBSet, maka fungsi itu pasti akan menerima dan menghasilkan sebuah RBT yang valid karena jika tidak, maka fungsi tersebut akan gagal untuk dikompilasi. Begitu juga untuk tipe yang lain seperti CT, IR, dan DT atau beberapa tipe lain yang digunakan sebagai pembantu dalam penulisan tipe-tipe tersebut. Tipe-tipe tersebut di antaranya adalah Valid untuk mengkodifikasi properti warna dan Incr yang menggunakan *Peano Arithmetic* untuk merepresentasikan jumlah simpul hitam untuk Properti Tinggi.

Karena program RBT yang dihasilkan oleh Weiritch dapat dikompilasi menjadi sebuah program yang berjalan, maka dapat disimpulkan bahwa program tersebut sudah berhasil diverifikasi. Usaha verifikasi ini bisa dilakukan sendiri oleh setiap orang dengan mengunduh program tersebut pada *link* yang sudah disediakan sebelumnya dan kemudian mengompilasi program tersebut dengan kompilator Haskell yang sudah dimiliki.

Verifikasi metode ini menjamin bahwa setiap program yang dihasilkan pasti mematuhi properti yang sudah ditetapkan. Namun, verifikasi dengan metode ini mengharuskan bahwa pengguna menulis ulang program dari awal dan mengharuskan pemahaman *syntax* Haskell yang lebih dalam. Struktur data yang dihasilkan oleh verifikasi ini juga tidak mudah digunakan. Oleh karena itu, verifikasi metode ini bisa direkomendasikan untuk fungsi kritis yang tidak mengizinkan kesalahan sedikit pun dalam penulisan program serta cukup berharga untuk mendapatkan perhatian khusus dan verifikasi yang memakan lebih banyak waktu.

#### Spesifikasi RBT dalam makalah Liquid Haskell

Dalam salah satu makalah awal yang dituliskan mengenai Liquid Haskell, *LiquidHaskell: Experience with refinement types in the real world*, (Vazou et al., 2014) salah satu contoh permasalahan yang bisa diverifikasi oleh Liquid Haskell adalah Pohon Merah-Hitam atau RBT. Dalam makalah itu dijelaskan bahwa RBT merupakan salah satu studi kasus yang baik untuk menjadi contoh perlakuan verifikasi karena struktur data ini memiliki spesifikasi yang jelas. Spesifikasi tersebut adalah Properti BST, Properti Warna, dan Properti Tinggi yang sudah disebutkan sebelumnya. Dalam makalah itu juga tertulis bagaimana menuliskan properti-properti tersebut dalam *syntax* spesifikasi Liquid Haskell.

Pohon standar RBT yang digunakan dalam studi kasus ini memiliki definisi sebagaimana berikut:

data Col = R | B

data Tree a = Leaf | Node Col a (Tree a) (Tree a)

Untuk mengkodifikasi pohon yang memiliki akar berwarna hitam, maka fungsi pembantu isB memiliki *syntax* sebagaimana berikut

measure isB

color (Node c x l r)

color (Leaf) :: Tree a -> Prop

= c == B

= true

Fungsi ini juga digunakan untuk membantu mengkodifikasi properti warna dalam fungsi isRB yang berbentuk sebagaimana berikut:

measure isRB :: Tree a -> Prop

isRB (Leaf) = true

isRB (Node c x l r) = isRB l && isRB r &&

c = R => (isB l && isB r)

Diberikan pula spesifikasi untuk fungsi-fungsi perantara yang tidak mematuhi properti warna untuk simpul akar. Fungsi untuk merepresentasikan hal ini diberi nama almostRB dan berbentuk seperti berikut:

measure almostRB :: Tree a -> Prop

almostRB (Leaf) = true

almostRB (Node c x l r) = isRB l && isRB r

Kemudian untuk properti tinggi, terlebih dahulu dibuat properti tinggi untuk mencatat jumlah simpul hitam pada cabang paling kiri dalam sebuah pohon dengan *syntax* sebagaimana berikut

measure bh :: Tree a -> Int

bh (Leaf) = 0

bh (Node c x l r) = bh l

+ if c = R then 0 else 1

Kemudian properti tinggi dapat dikodifikasi dalam fungsi isBal sebagaimana berikut:

measure isBal :: Tree a -> Prop

isBal (Leaf) = true

isBal (Node c x l r) = bh l = bh r

&& isBH l && isBH r (sic)

Dalam *paper* tersebut dinyatakan bahwa meskipun fungsi bh hanya menghitung jumlah simpul hitam dalam cabang paling kiri, fungsi isBal tetap akan memberikan jawaban yang benar mengenai keseimbangan simpul hitam dalam sebuah pohon.

Properti BST dikodifikasi menggunakan *abstract refinement* yang memungkinkan pendefinisian struktur data yang lebih abstrak.

data Tree a <l::a->a->Prop, r::a->a->Prop>

= Leaf

| Node { c :: Col

, key :: a

, lt :: Tree<l,r> a<l key>

, rt :: Tree<l,r> a<r key> }

Kemudian properti BST dikodifikasi dalam tipe OTree yang memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

type OTree a = Tree <{\k v -> v<k}, {\k v -> v>k}> a

Pada akhirnya seluruh properti tersebut dapat digabungkan menjadi properti RBT dengan kode seperti ini:

type RBT a = {v:OTree a | isRB v && isBal v}

Untuk pohon yang digunakan oleh fungsi perantara, isRB bisa diganti dengan almostRB.

Secara teori, verifikasi seluruh implementasi RBT dapat menggunakan spesifikasi yang sudah tertulis dalam makalah tersebut untuk langsung memverifikasi ketiga properti tersebut. Namun dalam kasus ini, spesifikasi yang sudah tertulis dalam makalah tersebut tidak cukup untuk melakukan verifikasi implementasi RBT yang dipelajari dalam tugas akhir ini karena:

1. Implementasi RBT Might menggunakan warna baru yaitu BB dan NB yang membuat spesifikasi yang tertulis dalam makalah harus diubah untuk memenuhi modifikasi tersebut. Ada pula perubahan urutan parameter yang tidak bisa dipahami oleh *syntax* Liquid Haskell sehingga implementasi properti RBT harus ditulis ulang dari awal.
2. Spesifikasi tersebut hanya ditulis untuk fungsi pokok yaitu fungsi penambahan dan penghapusan. Jika fungsi tersebut menggunakan fungsi lain maka harus dituliskan spesifikasi tambahan untuk fungsi-fungsi tersebut seperti sudah dijelaskan pada II.1.1.2.2. Fungsi-fungsi baru tersebut juga mungkin menggunakan fungsi-fungsi lain yang juga membutuhkan penulisan spesifikasi lain. Pada akhirnya, spesifikasi yang sudah tertulis pada makalah tersebut menjadi hanya sebagian kecil spesifikasi yang harus dituliskan untuk memverifikasi bahkan hanya fungsi penambahan dan penghapusan dalam implementasi RBT Might.

Oleh karena itu, walaupun solusi untuk penulisan spesifikasi RBT sudah dijelaskan dalam makalah yang dituliskan oleh Vazou, tetap dibutuhkan usaha lebih lanjut untuk mengadaptasi solusi tersebut dalam implementasi program tertentu. Namun, spesifikasi yang sudah tertulis bisa menjadi dasar dan batu loncatan untuk memudahkan penulisan spesifikasi untuk implementasi program yang dimiliki.

# ANALISA DAN RENCANA PENULISAN SPESIFIKASI

## Analisis Spesifikasi/Kebutuhan

Ranjit Jhala menyatakan bahwa tidak ada program yang bisa dikatakan benar (Jhala, 2018). Hanya ada program yang berhasil mematuhi spesifikasi yang sudah diberikan kepada program tersebut. Karena itu, sebelum verifikasi dilakukan terhadap sebuah program, harus ada spesifikasi yang terlebih dahulu ditentukan untuk menjadi patokan kebenaran dari implementasi sebuah program. Jika seseorang tidak memiliki kontak dengan penulis program, maka akan terjadi kesulitan untuk menentukan apakah masukan dan keluaran yang sebenarnya diinginkan oleh penulis program saat menulis suatu fungsi. Namun, ada beberapa karakteristik masalah yang dapat menjadi petunjuk untuk menentukan spesifikasi seperti apa yang cocok disematkan dalam sebuah fungsi dalam program.

### Penanganan *exception*/error

Fungsi error dalam bahasa Haskell digunakan untuk menandakan bahwa suatu fungsi menerima masukan yang tidak diinginkan sehingga menyebabkan program berhenti bekerja. Fungsi ini merupakan fungsi yang ekuivalen dengan fitur *exception* pada bahasa pemrograman lain. Liquid Haskell akan menyatakan bahwa seluruh fungsi yang mungkin menjalankan fungsi errortersebut tidak lolos verifikasi. Hal ini akan terjadi kecuali jika *precondition* disesuaikan agar fungsi tersebut tidak akan pernah menerima masukan yang akan membuat program menjalankan fungsi errortersebut. Salah satu contoh paling sederhana adalah fungsi pembagian berikut ini:

div :: (Fractional a) => a -> a -> a

div x 0 = error “Pembagian dengan angka 0”

div x y = x / y

Fungsi pembagian ini akan dianggap gagal verifikasi karena fungsi ini mungkin akan menerima masukan 0 sebagai penyebut. Namun jika fungsi tersebut diberikan *precondition* sebagaimana berikut:

{-@ div :: (Fractional a) => a -> {y:a | y /= 0} -> a @-}

div :: (Fractional a) => a -> a -> a

div x 0 = error “Pembagian dengan angka 0”

div x y = x / y

Maka program tidak akan pernah menerima masukan 0 sebagai penyebut sehingga program akan lolos tahap verifikasi.

### Tiga Properti RBT

Spesifikasi yang paling penting untuk diverifikasi dalam setiap implementasi struktur data RBT adalah tiga properti yang harus dipatuhi oleh setiap RBT. Setiap fungsi yang bisa digunakan oleh pengguna harus mendapat masukan RBT yang valid dan akan memberikan keluaran RBT yang valid. Jadi, untuk setiap fungsi yang bisa digunakan oleh pengguna minimal harus memiliki 3 spesifikasi sebagai berikut:

1. Fungsi akan menerima dan menghasilkan pohon yang untuk setiap simpul, setiap nilai pada cabang sebelah kiri memiliki nilai lebih kecil dari nilai pada simpul tersebut dan setiap nilai pada cabang sebelah kanan memiliki nilai lebih besar daripada nilai pada simpul tersebut (Properti BST).
2. Fungsi akan menerima dan menghasilkan RBT yang tidak memiliki simpul merah yang memiliki simpul anak berwarna merah (Properti Warna).
3. Fungsi akan menerima dan menghasilkan RBT yang memiliki jumlah simpul hitam yang sama untuk setiap jalur dari simpul akar ke simpul anak (Properti Tinggi).

Dalam kasus ini, fungsi-fungsi yang sangat membutuhkan spesifikasi ini adalah fungsi-fungsi yang menghadap pengguna seperti fungsi penambahan (*insert*) dan penghapusan (*delete*). Fungsi-fungsi tersebut harus menerima pohon yang valid dan menghasilkan pohon yang valid pula. Untuk itu, spesifikasi untuk kedua fungsi ini harus mencantumkan ketiga properti ini dalam *precondition* dan *postcondition* masing-masing.

### Spesifikasi untuk Fungsi yang digunakan oleh Fungsi Lain

Seperti telah disebutkan dalam II.1.1.2.2, menuliskan spesifikasi untuk sebuah fungsi tidak cukup untuk melakukan verifikasi terhadap fungsi tersebut. Namun, spesifikasi juga harus dituliskan untuk seluruh fungsi yang digunakan oleh fungsi tersebut. Spesifikasi yang dituliskan tersebut tersebut harus ditulis sedemikian rupa untuk membantu verifikasi fungsi utama yang menggunakan fungsi tersebut. Dibutuhkan analisis manual untuk menentukan spesifikasi untuk fungsi-fungsi tersebut namun ada beberapa petunjuk yang dapat membantu untuk mendapatkan spesifikasi tersebut. Petunjuk salah satunya dapat dilihat pada kode GADT Weiritch yang menambahkan spesifikasi tambahan untuk seluruh fungsi pembantu tersebut. Sebagai contoh, pada kode Weirich fungsi ins memiliki *signature* sebagai berikut:

ins :: Ord a => a -> CT n c a -> IR n a

Kode ini bisa diubah menjadi kode spesifikasi LH sebagai berikut

{-@ ins :: (Ord a) => a

-> x:CT a

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

Kode ini menyatakan bahwa fungsi ins menerima masukan sebuah nilai dan sebuah RBT yang memenuhi tipe CT. Kemudian fungsi ini akan memberikan keluaran sebuah RBT yang memenuhi tipe IM dan memiliki tinggi simpul hitam yang sama dengan tinggi simpul hitam pada masukan.

### Pembuktian Kerja Fungsi Utama

Pada II.3.2.1, dapat terlihat bahwa selain spesifikasi berkaitan dengan properti RBT, Might juga memasukkan berbagai properti yang spesifik dengan bagaimana fungsi *delete* bekerja yaitu semua properti *prop\_delete*\_*.* Properti seperti ini merupakan properti yang sangat menarik untuk ditambahkan dalam spesifikasi yang harus diverifikasi ke dalam program. Namun, karena limitasi *syntax* yang disediakan oleh Liquid Haskell properti-properti ini lebih sulit dituliskan dibandingkan properti-properti sebelumnya. Salah satu limitasi yang menyulitkan hal ini adalah cara kerja fungsi *measure* yang hanya menerima fungsi yang memiliki satu parameter. Selain itu, kurang banyak fungsi bawaan yang bisa digabungkan dalam sebuah fungsi *inline* yang bisa mengkodifikasi properti tersebut.

### Normalisasi Seluruh Warna pada Pohon

Pada setiap operasi pada pohon RBT Might, warna-warna baru yang dikenalkan oleh Might (BB dan NB) hanya digunakan untuk sementara. Seluruh pohon yang dihasilkan oleh seluruh operasi tidak boleh memiliki warna-warna tersebut karena operasi tersebut harus menghasilkan sebuah pohon RBT normal yang bisa dikenali oleh operasi RBT konvensional yang lain. Oleh karena itu, spesifikasi untuk fungsi yang menghadap pengguna harus memastikan bahwa pohon yang dihasilkan tidak memiliki warna-warna spesial tersebut.

## Spesifikasi untuk Setiap Fungsi

Berdasarkan analisis pada subbab sebelumnya, berikut adalah rencana yang lebih detail mengenai penulisan spesifikasi untuk setiap fungsi.

### Fungsi-fungsi yang memiliki fungsi error

Pada sumber kode yang akan diverifikasi terdapat 4 fungsi yang menggunakan fungsi error. Keempat fungsi tersebut adalah fungsi blacker, redder, max, dan removeMax.

Fungsi blacker dan redder masing-masing memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

blacker :: Color -> Color

blacker NB = R

blacker R = B

blacker B = BB

blacker BB = error "too black"

redder :: Color -> Color

redder NB = error "not black enough"

redder R = NB

redder B = R

redder BB = B

Untuk kedua kode di atas, dapat terlihat bahwa untuk menghindari error, spesifikasi cukup menambahkan *precondition* bahwa fungsi tidak akan menerima nilai BB untuk blacker dan NB untuk redder.

Kode untuk fungsi max dan removeMax masing-masing adalah sebagaimana berikut:

max :: RBSet a -> a

max E = error "no largest element"

max (T \_ \_ x E) = x

max (T \_ \_ x r) = max r

removeMax :: RBSet a -> RBSet a

removeMax E = error "no maximum to remove"

removeMax s@(T \_ \_ \_ E) = remove s

removeMax s@(T color l x r) = bubble color l x (removeMax r)

Sama seperti pada dua fungsi sebelumnya, pada dua fungsi ini spesifikasi cukup menambahkan *precondition* bahwa fungsi tidak akan menerima pohon yang kosong (E). Perlu diperhatikan bahwa fungsi-fungsi ini masing-masing merupakan fungsi rekursi atau fungsi yang menggunakan dirinya sendiri. Hal ini kadang-kadang akan menambah kompleksitas dalam penulisan spesifikasi karena fungsi itu harus mematuhi *precondition* miliknya sendiri saat menggunakan fungsi yang merupakan dirinya sendiri. Namun untungnya dalam kasus ini, penulis program sudah menangani kode sehingga fungsi max dan removeMax tidak akan menerima pohon yang kosong karena kasus itu sudah ditangani oleh baris kode sebelumnya.

### Penyesuaian Spesifikasi Tiga Properti RBT dalam Makalah Vazou

Seperti telah disebutkan sebelumnya dalam II.3.2.1 spesifikasi untuk tiga properti RBT telah dijabarkan dalam *paper* yang ditulis oleh Niki Vazou. Namun, dibutuhkan beberapa penyesuaian agar spesifikasi tersebut dapat digunakan dalam sumber kode ini. Sebagai permulaan, pohon RBT Might memiliki warna tambahan BB dan NB yang membuat struktur pohon tersebut menjadi agak berbeda sebagaimana berikut:

data Color =

R -- red

| B -- black

| BB -- double black

| NB -- negative black

deriving (Show, Eq)

data RBSet a =

E -- black leaf

| EE -- double black leaf

| T Color (RBSet a) a (RBSet a)

deriving (Show, Eq)

Untuk mengevaluasi properti warna, seluruh fungsi perantara menganggap bahwa pohon anak tidak memiliki warna spesial sehingga tidak terlalu banyak spesifikasi yang harus diubah. Hanya saja, karena tidak ada jaminan seperti itu untuk simpul akar, maka hampir seluruh fungsi tidak memakai fungsi isRB untuk mengecek pohon yang diterima melainkan menggunakan almostRB yang tidak mengecek simpul akar dalam pengecekan properti warna. Dalam kasus ini, almostRB sudah memiliki kode yang bisa mengakomodasi warna apa pun yang dimiliki simpul akar sehingga tidak perlu ada perubahan lebih lanjut.

Untuk menghitung tinggi simpul hitam, dalam pohon RBT Might, warna spesial BB memiliki nilai 2 simpul hitam dan warna NB memiliki nilai -1. Oleh karena itu, fungsi rb harus dimodifikasi sedikit untuk mengakomodasi nilai-nilai baru tersebut. Fungsi isBal masih berfungsi sebagaimana mestinya setelah perubahan ini.

Perubahan terbesar dibutuhkan dalam kodifikasi properti BST. Dalam studi kasus dalam makalah tersebut, struktur data yang digunakan memiliki urutan parameter tertentu yang berbeda dengan urutan parameter dalam sumber kode yang akan diverifikasi. Pada makalah tersebut, parameter *key* diletakkan sebelum parameter pohon anak sedangkan pada sumber kode ini parameter *key* diletakkan setelah parameter pohon anak kiri. *Syntax* Liquid Haskell yang digunakan tidak bisa bekerja dalam jika parameter *key* diletakkan setelah sebuah parameter pohon sehingga dibutuhkan cara baru untuk mengkodifikasi properti BST untuk sumber kode ini atau sumber kode ini harus diubah agar spesifikasi dapat dikodifikasi seperti yang sudah tertulis dalam makalah tersebut.

### Fungsi-Fungsi yang digunakan oleh Fungsi Utama

Fungsi utama insertdan deletemenggunakan beberapa fungsi yang juga menggunakan beberapa fungsi lain. Fungsi insertmemiliki *syntax* sebagaimana berikut:

insert :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

insert x s = blacken’ (ins s)

where ins E = T R E x E

ins s@(T color a y b)

| x < y = balance color (ins a) y

| x > y = balance color a y (ins b)

| otherwise = s

Dapat terlihat bawah fungsi insertmenggunakan fungsi blacken’ dan balance. Sesuai dengan penggunaannya dalam fungsi tersebut, fungsi blacken’ dan balance harus memiliki *postcondition* yang sama dengan fungsi insert. Fungsi blacken’ dan balance tidak menggunakan fungsi lain sehingga tidak ada fungsi lain yang membutuhkan spesifikasi tambahan.

Sementara itu fungsi delete lebih banyak menggunakan fungsi pembantu karena sifat fungsi tersebut lebih kompleks dari fungsi insert. Pada permukaannya, fungsi delete sendiri memiliki *syntax* yang sangat sederhana:

delete :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

delete x s = blacken (del x s)

Sama dengan kasus sebelumnya, blacken harus memiliki *postcondition* yang sama dengan delete. Namun, blacken menerima pohon dari fungsi del yang bisa memberikan pohon yang berbentuk apa pun. Fungsi blacken juga belum tentu bisa mengubah pohon berbentuk apa pun menjadi pohon yang memiliki kondisi yang sesuai dengan *postcondition* yang dimiliki oleh delete. Oleh karena itu, blacken harus menetapkan *precondition* yang seluas-luasnya yang masih memungkinkan fungsi tersebut untuk menghasilkan *postcondition* yang diinginkan dan fungsi del harus memiliki *postconditon* yang mematuhi *precondition* tersebut.

Salah satu petunjuk *precondition* yang dapat memenuhi hal ini terdapat dalam fungsi ekuivalen yang berada pada sumber kode GADT Weiritch. Dalam kode tersebut, fungsi blacken memiliki *signature*

blacken :: DT n a -> RBSet a

Tipe DT adalah tipe yang ekuivalen dengan properti almostRB dalam makalah Vazou. Oleh karena itu, blacken dapat mendapatkan *precondition* tambahan berupa almostRB dan del mendapatkan *postcondition* tambahan yang sama.

Fungsi del memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

del x E = E

del x s@(T color a' y b')

| x < y = bubble color (del x a') y b’

| x > y = bubble color a' y (del x b')

| otherwise = remove s

Fungsi del menggunakan fungsi bubble dan fungsi remove. Sama seperti pada fungsi insert, fungsi bubble dan fungsi remove juga harus memiliki *postcondition* yang sama dengan fungsi del.

Fungsi remove memiliki syntax seperti berikut:

remove :: RBSet a -> RBSet a

-- remove E = E -- impossible!

-- ; Leaves are easiest to kill:

remove (T R E \_ E) = E

remove (T B E \_ E) = EE

-- ; Killing a node with one child;

-- ; parent or child is red:

-- remove (T R E \_ child) = child

-- remove (T R child \_ E) = child

remove (T B E \_ (T R a x b)) = T B a x b

remove (T B (T R a x b) \_ E) = T B a x b

-- ; Killing a black node with one black child:

-- remove (T B E \_ child@(T B \_ \_ \_)) = blacker' child

-- remove (T B child@(T B \_ \_ \_) \_ E) = blacker' child

-- ; Killing a node with two sub-trees:

remove (T color l y r) = bubble color l' mx r

where mx = max l

l' = removeMax l

Fungsi remove menggunakan fungsi bubble, max, dan removeMax. Di antara fungsi-fungsi ini, fungsi bubble sekali lagi harus memiliki *postcondition* yang sama dengan fungsi remove. Dalam fungsi ini, fungsi max dan removeMax sudah memiliki *precondition* yang disebutkan dalam III.2.1 oleh karena itu fungsi remove harus menyediakan pohon yang memenuhi *precondition* tersebut. Jika fungsi tersebut tidak mampu, dapat ditambahkan *precondition* baru pada fungsi remove agar hal tersebut dapat terpenuhi.

Fungsi bubble memiliki *syntax* seperti ini:

bubble :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a

bubble color l x r

| isBB(l) || isBB(r) = balance (blacker color) (redder' l) x (redder' r)

| otherwise = balance color l x r

Fungsi del dan remove sama-sama menggunakan fungsi bubble dalam kondisi yang berbeda-beda. Fungsi bubble juga tidak mampu untuk menghasilkan pohon yang memenuhi *postcondition* yang diinginkan untuk setiap pohon yang ada. Oleh karena itu, seperti dengan fungsi blacken yang sudah disebutkan sebelumnya, fungsi bubble harus menetapkan *precondition* yang seluas mungkin yang masih bisa dipenuhi oleh fungsi del dan remove. Namun, tidak ada fungsi yang ekuivalen dengan bubble dalam kode GADT Weiritch sehingga tidak ada petunjuk yang mudah yang bisa digunakan dalam menetapkan *precondition* ini. Fungsi bubble juga menggunakan fungsi blacker dan juga fungsi redder’ yang menggunakan fungsi redder. Kedua fungsi tersebut memiliki *precondition* masing-masing yang sudah disebutkan pada subbab sebelumnya. Oleh karena itu, seperti pada fungsi remove, fungsi bubble harus bisa memenuhi *precondition* ini atau memiliki *precondition* yang bisa menyaring masukan agar *precondition* ini pasti terpenuhi.

Pada akhirnya, fungsi balance digunakan oleh bubble dan ins. Sama seperti fungsi bubble, fungsi ini juga tidak bisa memenuhi *postcondtion* yang diinginkan jika mendapatkan pohon yang berbentuk seperti apa pun. Oleh karena itu, fungsi balance harus memiliki *precondition* yang tepat yang bisa digunakan oleh kedua fungsi tersebut. Fungsi balance juga menggunakan dirinya sendiri (fungsi *recursive*) sehingga fungsi balance harus mampu melayani *precondition* dan *postcondition* miliknya sendiri. Fungsi ini juga tidak memiliki fungsi yang ekuivalen dengan fungsi-fungsi dalam sumber kode GADT Weiritch sehingga dibutuhkan usaha lebih besar untuk menentukan *precondition* untuk fungsi ini.

## Percobaan Verifikasi Manual

Verifikasi Manual untuk seluruh properti dan fungsi dari fungsi ini akan memakan waktu dan penjelasan yang sangat panjang untuk dituliskan dalam tulisan ini. Oleh karena itu, diberikan sebuah contoh pembuktian penjagaan properti tinggi untuk penghapusan akar dari sebuah pohon yang memiliki dua simpul anak berwarna hitam. Untuk pembuktian ini fungsi delete dijabarkan dengan menggunakan struktur yang prosedural.

Delete(x, tree):

Tree = del x tree

Tree = remove tree

l’ = removeMax l

l’ = remove l

l’ = EE

Tree = bubble color l’ mx r

Tree = balance T (blacker color) (redder’ l) x (redder’ r)

Tree = T color l x r

Dalam kasus ini, dapat terlihat bahwa operasi penghapusan tidak merusak keseimbangan jumlah simpul hitam antara cabang kiri dan kanan dan jumlah simpul hitam pada kedua cabang itu tetap sama.

## Rencana Pelaksanaan Verifikasi

Penulisan kode dan spesifikasi bisa dilakukan di perangkat lunak penulis teks apa pun. Untuk melakukan verifikasi, seseorang harus terlebih dahulu melakukan instalasi ghc 8.6.5 pada komputer yang dimiliki. Kemudian instalasi cabal juga diperlukan untuk membantu instalasi beberapa *library* Haskell. Setelah itu, seseorang bisa menggunakan perangkat lunak cabal untuk melakukan instalasi LiquidHaskell-0.8.10.2. Untuk verifikasi juga dibutuhkan instalasi sebuah *SMT Solver*. Untuk penulis, *SMT Solver* yang bisa bekerja dengan baik pada komputer penulis adalah Z3 4.8.7. Jika semua perangkat lunak tersebut sudah selesai diinstalasi, maka verifikasi bisa dilakukan dengan mudah dengan menjalankan perintah liquid <nama dan lokasi file> dan *file* tersebut akan diverifikasi oleh Liquid Haskell.

Jika seseorang tidak mau atau tidak mampu untuk melakukan hal tersebut, verifikasi sebuah kode juga bisa dilakukan secara daring pada laman<http://goto.ucsd.edu:8090/index.html> atau <https://liquid-demo.programming.systems/index.html> . Seorang pengguna hanya perlu menuliskan kode yang ingin diverifikasi pada tempat yang disediakan kemudian menekan tombol “Re Check”. Pengguna juga bisa menyimpan kode tersebut dengan menekan tombol “Permalink” untuk bisa melihat kembali kode tersebut di kemudian hari atau untuk membagikan kode tersebut pada orang lain. Pada laman tersebut juga ada beberapa kode contoh yang bisa digunakan untuk melihat contoh-contoh kode yang bisa diverifikasi menggunakan Liquid Haskell.

# IMPLEMENTASI DAN VERIFIKASI

## Implementasi Penulisan Spesifikasi

### Fungsi-Fungsi Pembantu

Sebelum menuliskan spesifikasi, sebelumnya dituliskan fungsi-fungsi pembantu untuk mengkodifikasi spesifikasi dalam bentuk *measure* dan *inline*.

#### Predikat Pengecek Pohon

Predikat adalah sebuah fungsi yang hanya memberikan hasil *true* atau *false*. Dalam penulisan spesifikasi, beberapa predikat sederhana dibutuhkan untuk mengecek kondisi pohon sebelum menjadi masukan sebuah fungsi.

Salah satu dari predikat tersebut adalah predikat untuk memastikan bahwa sebuah warna tidak terlalu merah atau tidak terlalu hitam. Predikat ini dibutuhkan untuk fungsi blacker dan redder masing-masing karena fungsi-fungsi tersebut adalah fungsi-fungsi yang tidak boleh menerima warna yang terlalu hitam atau terlalu merah.

Predikat-predikat tersebut ditulis sebagaimana berikut:

{-@ measure tooBlack @-}

tooBlack :: Color -> Bool

tooBlack BB = True

tooBlack \_ = False

{-@ measure tooRed @-}

tooRed :: Color -> Bool

tooRed NB = True

tooRed \_ = False

Predikat tersebut masing-masing akan memberikan nilai *true* jika warna yang diberikan merupakan warna yang terlalu merah (NB) atau terlalu hitam (BB).

Predikat lain yang dibutuhkan adalah predikat yang mengecek apakah suatu pohon hanya berisi sebuah simpul daun biasa. Predikat tersebut dibutuhkan oleh beberapa fungsi yang tidak bisa menangani pohon yang kosong seperti fungsi max dan removeMax. Predikat tersebut ditulis sebagaimana berikut:

{-@ measure normalLeaf @-}

normalLeaf :: RBSet a -> Bool

normalLeaf E = True

normalLeaf \_ = False

Beberapa predikat berikutnya membutuhkan informasi warna dari akar dari pohon yang dicek. Dalam program sudah terdapat sebuah fungsi yang memberikan informasi tersebut yaitu fungsi color.

color :: RBSet a -> Color

color (T c \_ \_ \_) = c

color E = B

color EE = BB

Oleh karena itu, fungsi tersebut dapat dijadikan menjadi sebuah fungsi *measure* hanya dengan menambahkan satu baris kode.

{-@ measure color @-}

Beberapa predikat yang membutuhkan fungsi color ini adalah predikat yang mengecek bahwa sebuah pohon memiliki warna hitam biasa (B). Fungsi ini dibutuhkan untuk membantu kodifikasi properti warna. Predikat tersebut dituliskan sebagaimana berikut:

{-@ inline blackRoot @-}

blackRoot :: RBSet a -> Bool

blackRoot t = color t == B

Kemudian ada fungsi yang membutuhkan pohon yang memenuhi predikat isBB yang sudah berada dalam program yaitu fungsi bubble. Predikat tersebut berfungsi untuk mengecek apakah sebuah pohon memiliki akar yang berwarna *double black* (BB). Predikat tersebut dituliskan sebagaimana berikut:

isBB :: RBSet a -> Bool

isBB EE = True

isBB (T BB \_ \_ \_) = True

isBB \_ = False

Karena predikat tersebut sudah berada dalam program, prosedur yang sama seperti yang dilakukan pada fungsi color harusnya bisa dilakukan pula pada predikat ini. Namun, fungsi isBB dituliskan dalam *syntax* yang tidak bisa diterima sebagai *measure* oleh Liquid Haskell. Oleh karena itu, dibuat sebuah fungsi baru yang memiliki fungsionalitas yang sama dengan fungsi tersebut bernama isBB’.

{-@ inline isBB' @-}

isBB' t = color t == BB

Dan kemudian pada fungsi asli ditambahkan sebuah spesifikasi yang memastikan bahwa fungsi ini pasti identik satu sama lain.

{-@ isBB :: rb : RBSet a -> { b : Bool | b <=> isBB' rb } @-}

Pembuatan fungsi isBB’ seperti ini dibutuhkan jika ada sebuah fungsi asli yang ditulis oleh pemrogram yang bagus untuk dijadikan sebuah fungsi *measure* namun *syntax* dari fungsi tersebut bukan merupakan *syntax* yang bisa diterima oleh Liquid Haskell. Oleh karena itu, ditulis fungsi baru yang memiliki fungsionalitas yang sama namun dalam *syntax* yang lebih dikenali oleh Liquid Haskell kemudian ditambahkan spesifikasi seperti itu untuk memastikan bahwa program verifikasi dapat mengenali bahwa kedua fungsi tersebut adalah identik.

Dibutuhkan pula sebuah predikat untuk mengecek apakah pohon RBT masih mengandung warna spesial BB atau NB atau tidak. Untuk kebutuhan ini dibuat dua buah predikat yaitu noSpecialColor dan noSpecialChild. Prediakt noSpecialColor memiliki fungsi untuk mengecek ketiadaan warna spesial dalam keseluruhan pohon dan memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

{-@ inline noSpecialColor @-}

noSpecialColor :: RBSet a -> Bool

noSpecialColor t = (color t /= BB)

&& (color t /= NB)

&& noSpecialChild t

Kemudian predikat noSpecialChild merupakan sebuah fungsi yang hanya mengecek apakah anak-anak dari sebuah pohon memiliki warna spesial atau tidak dan tidak mengecek warna dari akar pohon. Isi dari predikat ini didefinisikan secara *recursive* bersamaan dengan noSpecialColor.

{-@ measure noSpecialChild @-}

noSpecialChild :: RBSet a -> Bool

noSpecialChild (T \_ l \_ r) = noSpecialColor l && noSpecialColor r

noSpecialChild \_ = True

Secara logika, seharusnya seluruh pohon yang memenuhi predikat noSpecialColor juga memenuhi predikat noSpecialChild namun belum tentu sebaliknya. Untuk membuktikan beberapa fungsi, program verifikasi membutuhkan penegasan mengenai hubungan kedua fungsi ini. Untuk itu, dituliskan spesifikasi khusus untuk noSpecialColor untuk menyatakan relasi antara kedua fungsi tersebut.

{-@ noSpecialColor :: x:RBSet a -> {v:Bool | (v => noSpecialChild x) } @-}

Spesifikasi ini menyatakan bahwa seluruh pohon yang memenuhi noSpecialColor juga harus memenuhi predikat noSpecialChild. Penggunaan lambang => namun bukan <=> menegaskan hubungan tersebut.

#### Properti-Properti RBT

Properti yang tidak memerlukan modifikasi yang terlalu jauh untuk kodifikasi dibandingkan dengan kode yang dituliskan dalam makalah Vazou adalah Properti Warna. Untuk itu, fungsi pembantu yang dituliskan dalam kasus ini tidak jauh berbeda dengan kode yang sudah disebutkan sebelumnya.

{-@ measure redChildIsBlack @-}

redChildIsBlack :: RBSet a -> Bool

redChildIsBlack E = True

redChildIsBlack EE = True

redChildIsBlack (T R a x b) = color a == B &&

color b == B &&

redChildIsBlack a && redChildIsBlack b

redChildIsBlack (T \_ a x b) = redChildIsBlack a && redChildIsBlack b

Fungsi redChildIsBlack ini memiliki fungsionalitas yang sama dengan fungsi isRB pada makalah Vazou. Sebagai pelengkap, fungsi almostRB diadaptasi menjadi fungsi redChildIsBlackNT sebagaimana berikut:

{-@ measure redChildIsBlackNT @-}

redChildIsBlackNT :: RBSet a -> Bool

redChildIsBlackNT (T \_ l \_ r) = redChildIsBlack l && redChildIsBlack r

redChildIsBlackNT \_ = True

Seperti dalam makalah Vazou, seluruh pohon yang memenuhi properti isRB harusnya juga memenuhi properti almostRB. Dalam kasus ini, program verifikasi harus mendapat kepastian bahwa pohon yang memenuhi redChildIsBlack juga memenuhi redChildIsBlackNT. Oleh karena itu, ditambahkan spesifikasi khusus pada redChildIsBlack untuk menegaskan hubungan antara kedua fungsi tersebut.

{-@ redChildIsBlack :: x:RBSet a -> {v:Bool | v => redChildIsBlackNT x} @-}

Properti selanjutnya yang membutuhkan fungsi pembantu untuk kodifikasi adalah Properti Tinggi. Terlebih dahulu dibutuhkan sebuah fungsi untuk menentukan ekuivalensi setiap warna terhadap warna hitam. Fungsi tersebut dituliskan secara sederhana sebagaimana berikut:

{-@ measure colorValue @-}

colorValue :: Color -> Int

colorValue NB = -1

colorValue R = 0

colorValue B = 1

colorValue BB = 2

Fungsi ini akan dapat mempermudah perhitungan jumlah simpul hitam pada setiap cabang yang dibutuhkan untuk memeriksa Properti Tinggi.

Fungsi untuk memeriksa jumlah simpul hitam tidak terlalu jauh dengan fungsi yang sudah tertulis pada makalah Vazou. Fungsi bh diadaptasi menjadi fungsi blackHeightL yang memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

{-@ measure blackHeightL @-}

blackHeightL :: RBSet a -> Int

blackHeightL (T c l \_ \_) = blackHeightL l + colorValue c

blackHeightL t = colorValue $ color t

Kemudian fungsi isBal diadaptasi menjadi fungsi validBlackHeight yang tertulis sebagaimana berikut:

{-@ measure validBlackHeight @-}

validBlackHeight :: RBSet a -> Bool

validBlackHeight E = True

validBlackHeight EE = True

validBlackHeight (T \_ l \_ r) = validBlackHeight l && validBlackHeight r

&& blackHeightL l == blackHeightL r

Properti BST tidak memiliki kode yang ekuivalen yang bisa dengan mudah digunakan dari dalam makalah Vazou. Untuk itu, fungsi pembantu untuk mengkodifikasi properti tersebut harus ditulis dari awal. Fungsi prop\_BST’ ditulikan sebagaimana berikut:

{-@ measure prop\_BST' @-}

prop\_BST' :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_BST' (T \_ l@(T \_ \_ xl \_) x

r@(T \_ \_ xr \_)) = (xl < x) && (x < xr)

&& prop\_BST' l

&& prop\_BST' r

prop\_BST' (T \_ l@(T \_ \_ xl \_) x r) = (xl < x)

&& prop\_BST' l

&& prop\_BST' r

prop\_BST' (T \_ l x r@(T \_ \_ xr \_)) = (x < xr)

&& prop\_BST' l

&& prop\_BST' r

prop\_BST' (T \_ l x r) = prop\_BST' l && prop\_BST' r

prop\_BST' \_ = True

Fungsi ini merupakan kodifikasi dari karakteristik dari BST yang harus memiliki satu anak yang memiliki nilai yang lebih kecil dari akar dan satu anak yang memiliki nilai yang lebih besar dari akar. Liquid Haskell tidak mampu menerima fungsi *measure* yang memiliki parameter yang lebih dari satu sehingga fungsi ini harus ditulis secara *recursive* dan tidak menggunakan fungsi lain yang memiliki dua parameter untuk memudahkan penulisan kode. Sudah ada fungsi prop\_BST yang digunakan untuk keperluan lain dalam program sehingga fungsi ini memiliki nama prop\_BST’.

Langkah selanjutnya adalah menggabungkan seluruh fungsi-fungsi pembantu tersebut menjadi sebuah fungsi yang padu yang melambangkan seluruh karakteristik dari RBT. Dalam langkah ini dibuat 3 fungsi untuk menggambarkan tiga kondisi pohon RBT yang dibutuhkan oleh fungsi-fungsi dalam program. Ketiga fungsi ini memiliki karakteristik yang ekuivalen dengan beberapa tipe pada kode Weiritch.

Tipe CT dikodifikasi menjadi fungsi prop\_CT yang memiliki kode sebagaimana berikut:

{-@ inline prop\_CT @-}

prop\_CT :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_CT t = noSpecialColor t

&& redChildIsBlack t

&& validBlackHeight t

&& prop\_BST' t

Pohon yang memiliki karakteristik CT merupakan pohon yang memiliki properti warna, tinggi, BST, serta tidak memiliki warna spesial. Akar dari pohon ini bisa memiliki warna merah ataupun hitam.

Tipe RBSet memiliki karakteristik yang sama persis dengan tipe CT namun memiliki akar yang harus berwarna hitam. Oleh karena itu, karakteristik tersebut dikodifikasi menjadi fungsi prop\_RBSet yang memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

{-@ inline prop\_RBSet @-}

prop\_RBSet :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_RBSet t = prop\_CT t && blackRoot t

Kemudian dua tipe DT dan IR pada kode Weiritch digabungkan dalam sebuah fungsi yaitu prop\_IM (*Intermediate*). Pohon ini merupakan pohon yang mematuhi properti tinggi dan BST namun tidak mematuhi properti warna di akar pohon. Seluruh akar dari pohon ini masih harus mematuhi properti warna tersebut. Pohon ini juga tidak boleh memiliki warna spesial kecuali pada akar pohon.

{-@ inline prop\_IM @-}

prop\_IM t = noSpecialChild t

&& redChildIsBlackNT t

&& validBlackHeight t

&& prop\_BST' t

Untuk memperindah penulisan spesifikasi serta membuat fungsi-fungsi ini menjadi tipe seperti yang tertulis pada kode Weiritch, dibuat beberapa *alias* untuk melakukan hal tersebut.

{-@ type RT a = {v:RBSet a | prop\_RBSet v} @-}

{-@ type CT a = {v:RBSet a | prop\_CT v} @-}

{-@ type IM a = {v:RBSet a | prop\_IM v} @-}

Dengan kode seperti ini, kode yang membutuhkan properti-properti ini tidak harus memasukkan fungsi-fungsi tersebut dalam *constraints* namun cukup mengubah tipe dari pohon yang dibutuhkan dari RBSet menjadi tipe yang diinginkan

### Spesifikasi untuk Setiap Fungsi

Pada akhirnya langkah yang harus dilakukan setelah seluruh analisis yang telah dilakukan sebelumnya adalah menuliskan spesifikasi yang tepat untuk fungsi-fungsi pada sumber kode. Dua fungsi yang paling utama dalam sumber kode yang kita miliki adalah fungsi insert dan delete dan oleh karena itu fungsi-fungsi tersebut adalah fungsi yang harus memiliki spesifikasi yang sesuai dan juga lolos verifikasi. Oleh karena itu, peletakan spesifikasi dapat dimulai dari kedua fungsi tersebut kemudian dilanjutkan pada seluruh fungsi yang digunakan oleh kedua fungsi tersebut.

#### Fungsi insert

Pada dasarnya, penulisan spesifikasi yang menyatakan bahwa seluruh pohon yang menjadi masukan dan keluaran pada fungsi insert seluruhnya harus memenuhi tiga properti RBT sangat mudah. Seseorang cukup menggunakan seluruh fungsi pembantu yang dituliskan sebelumnya dan mengkodifikasi spesifikasi tersebut menjadi sebagaimana berikut:

{-@ insert :: (Ord a) => a -> RT a -> RT a @-}

Dapat terlihat bahwa spesifikasi ini menyatakan bahwa fungsi insert menerima sebuah nilai bertipe nilai yang memiliki urutan dan juga sebuah pohon yang memenuhi seluruh properti RBT kemudian akan memberikan keluaran sebuah pohon yang juga memenuhi seluruh properti RBT. Jika Liquid Haskell mampu memverifikasi spesifikasi ini, maka tugas kita sudah selesai. Namun, Liquid Haskell mensyaratkan agar penulis spesifikasi juga menulis spesifikasi untuk seluruh fungsi yang digunakan oleh fungsi yang diverifikasi sehingga masih ada pekerjaan yang harus dilakukan.

Fungsi insert memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

insert :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

insert x s = blacken’ (ins s)

where ins E = T R E x E

ins s@(T color a y b) | x < y = balance color (ins a) y b

| x > y = balance color a y (ins b)

| otherwise = s

Fungsi ini menggunakan 2 buah fungsi yaitu blacken’ dan ins. Fungsi ins sebenarnya merupakan sebuah fungsi terpisah namun fungsi ini hanya dikenali dan digunakan oleh fungsi insert. Dalam beberapa kasus Liquid Haskell tidak akan mengenali penggunaan eksklusif fungsi ins ini oleh fungsi insert namun dalam kasus ini hal itu tidak akan menimbulkan perbedaan. Sesuai dengan pembahasan pada III.2.3, dikarenakan struktur dari *syntax* dari fungsi insert, maka fungsi ins akan menerima pohon yang dibatasi oleh *precondition* dari fungsi insert dan fungsi blacken’ harus menghasilkan sebuah pohon yang memenuhi *postcondition* dari fungsi insert.

Fungsi ins tidak harus memiliki *precondition* yang sama persis dengan fungsi insert namun fungsi tersebut harus memiliki *precondition* yang masih bisa dipenuhi oleh *precondition* dari fungsi insert. Dengan kata lain, *precondition* dari fungsi ins dapat ditulis menjadi jauh lebih luas (*supertype*) dari *precondition* fungsi insert. Kebalikannya, fungsi blacken’ harus menghasilkan pohon yang juga memenuhi seluruh *postcondition* dari fungsi insert. Oleh karena itu, fungsi blacken’ dapat memiliki *postcondition* yang jauh lebih sempit (*subtype*) dari *postcondition* fungsi insert.

Fungsi blacken’ memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

blacken’ :: RBSet a -> RBSet a

blacken’ (T R a x b) = T B a x b

blacken’ (T B a x b) = T B a x b

Dapat terlihat bahwa jika blacken’ mampu memenuhi *precondition* dan *postcondition* dari fungsi utama insert untuk menghasilkan pohon RBT yang valid ketika menerima pohon RBT yang valid karena fungsi ini tidak mempengaruhi properti tinggi dan BST sama sekali. Fungsi ini juga tidak akan melanggar properti warna karena sebuah simpul akar berwarna merah yang berubah menjadi warna hitam tidak akan mungkin melanggar properti warna karena properti warna hanya akan dilanggar ketika sebuah simpul berwarna merah memiliki anak berwarna hitam. Karena pada kasus ini sebuah simpul berwarna merah dan memiliki anak berwarna hitam menjadi sebuah simpul berwarna hitam dan memiliki anak berwarna hitam, maka properti warna tetap terjaga.

Namun untuk memudahkan pembuktian dari fungsi sebelumnya atau fungsi ins, maka akan lebih baik jika *precondition* dari fungsi blacken’ bisa dilonggarkan. Menurut sumber kode Weiritch, fungsi blacken’ dapat menerima pohon yang hanya memenuhi karakteristik IM dan masih bisa menghasilkan pohon RBT yang valid. Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat karakteristik pohon IM yang sudah memenuhi semua properti dari RBT yang valid namun memiliki simpul akar yang berwarna merah dan memiliki anak yang berwarna merah juga. Karena fungsi ini membuat simpul akar tersebut menjadi berwarna hitam, maka konfigurasi simpul akar berubah menjadi sebuah simpul berwarna hitam yang memiliki anak berwarna merah dan konfigurasi itu memenuhi properti warna. Oleh karena itu, spesifikasi dari fungsi blacken’ dapat dituliskan menjadi:

{-@ blacken’ :: IM a -> RT a @-}

Jadi fungsi ins harus memiliki *precondition* yang lebih luas dari RT (*precondition* insert) dan *postcondition* yang lebih sempit dari IM (*precondition* blacken’). Jika kedua kondisi tersebut dipenuhi secara eksak, maka spesifikasi dari ins menjadi

{-@ ins :: (Ord a) => x:RT a -> v:IM a @-}

Namun, ins merupakan fungsi yang *recursive* dan akan dipakai berulang-ulang pada anak dari sebuah pohon. Oleh karena itu, akan lebih baik jika fungsi ins memiliki *precondition* yang seluas mungkin dan *postcondition* yang sesempit mungkin namun masih dapat dipenuhi oleh fungsi ini.

Sumber kode Weiritch memperluas *precondition* ins dari RT menjadi CT dan mempersempit *postcondition* dengan menambahkan syarat bahwa tinggi simpul hitam dari masukan harus sama dengan keluaran. Hal ini dikarenakan fungsi ins akan diaplikasikan kembali kepada anak sebuah pohon RBT yang valid dan anak tersebut belum tentu memiliki karakteristik RT namun pasti memiliki karakteristik CT. Hasil operasi terhadap anak sebuah simpul juga harus menjaga jumlah simpul hitam pada anak tersebut karena jika tidak, maka akan terjadi ketidakseimbangan jumlah simpul hitam antara anak kanan dan anak kiri yang akan menyebabkan pelanggaran properti tinggi. Oleh karena itu, spesifikasi dari fungsi ins dituliskan sebagaimana berikut:

{-@ ins :: (Ord a) => x:CT a -> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

Sebenarnya fungsi ins mampu menangani *precondition* yang lebih luas lagi yaitu mengubah pohon dengan karakteristik IM menjadi pohon dengan *postcondition* yang sama. Dengan mempertimbangkan hal tersebut spesifikasi ins dapat dituliskan menjadi:

{-@ ins :: (Ord a) => x:IM a -> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

Fungsi ins menggunakan fungsi balance dalam operasinya. Seperti dalam kasus fungsi blacken’, hal itu berarti bahwa fungsi balance harus paling sedikit memiliki *postcondition* yang sama sempit atau lebih sempit dari *postcondition* fungsi ins. Fungsi balance memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

balance :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a

-- Okasaki's original cases:

balance B (T R (T R a x b) y c) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B (T R a x (T R b y c)) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x (T R (T R b y c) z d) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x (T R b y (T R c z d)) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

-- Six cases for deletion:

balance BB (T R (T R a x b) y c) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB (T R a x (T R b y c)) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T R (T R b y c) z d) = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T R b y (T R c z d)) = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T NB (T B b y c) z d@(T B \_ \_ \_))

= T B (T B a x b) y (balance B c z (redden d))

balance BB (T NB a@(T B \_ \_ \_) x (T B b y c)) z d

= T B (balance B (redden a) x b) y (T B c z d)

balance color a x b = T color a x b

Fungsi ini bekerja dengan asumsi bahwa fungsi ini akan menerima sebuah pohon yang memiliki karakteristik CT dan sebuah pohon yang memiliki karakteristik IM. Fungsi ini kemudian akan mengatur ulang struktur dari kedua anak tersebut untuk menjadi sebuah pohon baru yang memiliki karakteristik IM. Kedua pohon yang menjadi masukan juga harus memiliki tinggi simpul hitam yang sama.

Sumber kode Weiritch menangani kodifikasi dua parameter yang masing-masing bisa memiliki karakteristik IM atau CT dengan membagi dua fungsi ini menjadi dua buah fungsi. Sebuah fungsi menerima pohon IM sebagai parameter pertama dan pohon CT sebagai parameter kedua dan fungsi yang lain menerima parameter dengan urutan yang sebaliknya. Karena studi ini bertujuan untuk melakukan verifikasi tanpa perubahan program maka hal ini tidak dapat dilakukan dalam kasus ini. Namun, hal ini dapat ditangani dalam Liquid Haskell dengan menulis spesifikasi sebagaimana berikut:

{-@ balance :: c:Color

-> {l:RBSet a | (prop\_IM l) || (prop\_CT l) }

-> x:a

-> {r:RBSet a | ((prop\_IM l && prop\_CT r) ||

(prop\_CT l && prop\_IM r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r)}

-> {v:RBSet a | (prop\_IM v))

&& (blackHeightL v == (blackHeightL l + colorValue c))}

@-}

Spesifikasi ini menggunakan asumsi yang sudah disebutkan sebelumnya sebagai *precondition* dan menggunakan *postcondition* ins menjadi *postcondition* balance. Namun, *postcondition* tersebut diubah sedikit untuk mencerminkan bahwa jumlah simpul hitam dari pohon hasil harus sama dengan jumlah simpul hitam anak dan nilai dari simpul akar.

Namun, karena fungsi balance juga merupakan sebuah fungsi yang *recursive*, maka *postcondition* tersebut kurang sempit untuk fungsi itu sendiri. Baris ke 9 dan ke 10 dari fungsi tersebut memiliki asumsi bahwa keluaran dari fungsi ini tidak hanya memenuhi karakteristik IM namun juga karakteristik CT jika warna dari akar pohon adalah hitam. Hal ini dimungkinkan oleh sifat dari pohon IM yang pasti juga memenuhi karakteristik CT jika akar pohon berwarna hitam karena pohon tersebut tidak mungkin melanggar properti warna di simpul akar yang hanya mungkin terjadi jika simpul tersebut berwarna merah. Oleh karena itu, *postcondition* dari fungsi ini harus diubah menjadi:

{v:RBSet a | ((c /= B && prop\_IM v) || prop\_CT v)

&& (blackHeightL v == (blackHeightL l + colorValue c))}

Batasan ini menangani kebutuhan fungsi yang harus mampu menghasilkan pohon CT jika warna yang diberikan adalah hitam dan pohon IM jika tidak. Kebutuhan penuh dari fungsi balance menjadi

{-@ balance :: c:Color

-> {l:RBSet a | (prop\_IM l) || (prop\_CT l) }

-> x:a

-> {r:RBSet a | ((prop\_IM l && prop\_CT r) ||

(prop\_CT l && prop\_IM r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r)}

-> {v:RBSet a | ((c /= B && prop\_IM v) || prop\_CT v)

&& (blackHeightL v == (blackHeightL l + colorValue c))}

@-}

#### Fungsi delete

Fungsi delete memiliki struktur yang mirip dengan fungsi insert dengan perbedaan bahwa dalam fungsi ini fungsi pembantu del dilepas menjadi sebuah fungsi independen berbeda dengan fungsi ins yang ditulis menjadi fungsi eksklusif yang hanya bisa digunakan oleh insert. Fungsi delete juga menerima dan menghasilkan sebuah pohon RBT yang valid sehingga spesifikasi dari fungsi tersebut merupakan spesifikasi yang sama persis denga spesifikasi dari fungsi insert. Kode dari fungsi delete dan spesifikasinya dituliskan sebagaimana berikut:

{-@ delete :: (Ord a) => a -> x:RT a -> v:RT a @-}

delete :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

delete x s = blacken (del x s)

Fungsi blacken juga merupakan fungsi yang sangat mirip dengan fungsi blacken’ yang digunakan oleh fungsi insert namun fungsi ini juga bisa menangani kasus yang lebih luas yang mungkin dihasilkan oleh fungsi del.

{-@ blacken :: IM a -> RT a @-}

blacken :: RBSet a -> RBSet a

blacken (T B a x b) = T B a x b

blacken (T BB a x b) = T B a x b

blacken E = E

blacken EE = E

Kemudian fungsi del juga memiliki spesifikasi yang sama dengan fungsi ins namun *precondition* dari fungsi ini tidak bisa diperluas lagi dari CT menjadi IM karena fungsi bubble yang digunakan oleh fungsi del hanya tidak bisa menerima pohon yang mempunyai kemungkinan memiliki akar berwarna BB.

{-@ del :: Ord a => a

-> x:CT a

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

del x E = E

del x s@(T color a' y b') | x < y = bubble color (del x a') y b'

| x > y = bubble color a' y (del x b')

| otherwise = remove s

Hal yang paling membedakan isi dari fungsi insert dan fungsi delete adalah fungsi-fungsi yang digunakan dalam fungsi ins dan fungsi del. Fungsi ins hanya langsung menggunakan fungsi balance. Namun, walaupun pada akhirnya fungsi del juga menggunakan fungsi delete, tapi fungsi ini terlebih dahulu menggunakan beberapa fungsi perantara diantaranya adalah fungsi bubble dan fungsi remove.

Fungsi remove memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

remove :: RBSet a -> RBSet a

remove (T R E \_ E) = E

remove (T B E \_ E) = EE

remove (T B E \_ (T R a x b)) = T B a x b

remove (T B (T R a x b) \_ E) = T B a x b

remove (T color l y r) = bubble color l' mx r

where mx = max l

l' = removeMax l

Fungsi ini menggunakan funsi bubble, max, dan removeMax. Pada analisis sebelumnya, diketahui bahwa fungsi max dan removeMax sudah memiliki *precondition* sendiri yang harus dipenuhi karena fungsi itu menggunakan fungsi error. Oleh karena itu, *precondition* tersebut juga harus diperhitungkan untuk penulisan spesifikasi dari fungsi remove. Namun karena fungsi remove menggunakan kedua fungsi tersebut, maka spesifikasi pada kedua fungsi tersebut juga harus ditambah untuk memenuhi kebutuhan dari fungsi remove.

Fungsi max tidak digunakan langsung oleh fungsi remove sehingga fungsi ini tidak perlu menseleraskan *postcondition* dengan fungsi remove. Namun, fungsi ini digunakan untuk menjadi parameter pada fungsi bubble dan tergantung *precondition* dari fungsi bubble, *postcondition* dari fungsi ini mungkin harus diubah. Fungsi max memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

max :: RBSet a -> a

max E = error "no largest element"

max (T \_ \_ x E) = x

max (T \_ \_ x r) = max r

Fungsi ini tidak membutuhkan penanganan khusus selain *precondition* yang dibutuhkan oleh fungsi error yang sudah disebutkan sebelumnya. Oleh karena itu, spesifikasi dari fungsi ini adalah

{-@ max :: {x: RBSet a | not normalLeaf x} -> a @-}

Berbeda dengan fungsi max, fungsi removeMax memiliki *syntax* yang lebih kompleks

removeMax :: RBSet a -> RBSet a

removeMax E = error "no maximum to remove"

removeMax s@(T \_ \_ \_ E) = remove s

removeMax s@(T color l x r) = bubble color l x (removeMax r)

Dapat terlihat bahwa fungsi removeMax menggunakan fungsi bubble dan juga fungsi remove. Berdasarkan penggunaan yang dapat terlihat, fungsi removeMax harus memenuhi *precondition* yang dimiliki oleh fungsi remove dan fungsi bubble. Berdasarkan informasi yang dimiliki saat ini, spesifikasi sementara dari fungsi removeMax adalah

{-@ removeMax :: {x:RBSet a | not normalLeaf x} -> RBSet a @-}

Spesifikasi ini dapat berubah sangat banyak tergantung dari penetapan *precondition* dari fungsi bubble.

Fungsi bubble memiliki *syntax* sebagaimana berikut:

bubble :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a

bubble color l x r

| isBB(l) || isBB(r) = balance (blacker color) (redder' l) x (redder' r)

| otherwise = balance color l x r

Fungsi ini menggunakan fungsi balance, blacker, dan redder’. Fungsi balance sudah memiliki *precondition* yang sudah ditetapkan sebelumnya oleh karena itu *precondition* dari fungsi bubble harus menyesuaikan terhadap *precondition* tersebut. Dengan penyesuaian tersebut spesifikasi dari fungsi bubble dituliskan sebagaimana berikut:

{-@ bubble :: {c:Color | not (tooBlack c)}

-> {l:RBSet a | prop\_CT l || prop\_IM l}

-> x:a

-> {r:RBSet a | ((prop\_CT l && prop\_IM r) ||

(prop\_IM l && prop\_CT r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r) }

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL l + (colorValue c) }

@-}

Fungsi blacker hanya berfungsi untuk menambahkan kehitaman dari sebuah warna. Fungsi ini juga menggunakan sebuah fungsi error sehingga *precondition* dari fungsi ini harus disesuaikan. Ditegaskan pula bahwa fungsi ini akan menghasilkan warna dengan nilai hitam yang ditambah satu sehingga spesifikasi dari fungsi tersebut dituliskan seperti ini:

{-@ blacker :: {x:Color | not tooBlack x}

-> {v:Color | colorValue v == (colorValue x + 1)} @-}

Fungsi redder’ merupakan sebuah fungsi yang membuat warna dari akar pohon menjadi lebih merah. Fungsi ini menggunakan fungsi redder yang menggunakan fungsi error dan merupakan fungsi yang ekuivalen dengan fungsi blacker. Fungsi tersebut memiliki spesifikasi sebagaimana berikut:

{-@ redder :: {x:Color | not tooRed x}

-> {v:Color | (colorValue v == (colorValue x - 1))

&& ((x == BB) => (v == B)) } @-}

Dapat terlihat bahwa fungsi ini mendapat *precondition* yang ditujukan untuk menghindari fungsi error serta *postcondition* yang menyatakan bahwa nilai kehitaman dari warna yang akan dihasilkan akan berkurang. Batasan khusus berkaitan dengan BB ditambahkan untuk menyelesaikan masalah interaksi antara fungsi bubble dan isBB yang akan dijelaskan selanjutnya.

Salah satu karakteristik paling penting dari fungsi bubble adalah fungsi ini hanya akan menggunakan fungsi blacker dan redder’ jika pohon masukan memiliki warna BB. Fungsi redder’ digunakan pada dua parameter balance yang membutuhkan pohon yang memiliki karakteristik CT atau IM dan tidak bisa menerima jika fungsi itu menerima dua pohon IM sekaligus. Oleh karena itu, fungsi redder’ harus memiliki batasan sedemikian sehingga jika fungsi tersebut diberikan pohon yang memiliki warna BB, maka fungsi itu akan menghasilkan pohon yang memiliki karakteristik CT. Fungsi ini juga harus bisa memenuhi *precondition* dari fungsi redder yang tidak bisa menerima warna yang terlalu merah karena hal itu akan memicu fungsi error pada fungsi redder. Oleh karena itu, spesifikasi pada fungsi redder’ harus ditulis menjadi spesifikasi yang lebih kompleks sebagaimana berikut:

{-@ redder' :: {x:RBSet a | (prop\_IM x && isBB' x) || (prop\_CT x)}

-> {v:RBSet a | ((prop\_IM x && isBB' x && prop\_CT v) ||

(prop\_CT x && prop\_IM v))

&& (blackHeightL v == (blackHeightL x - 1)) } @-}

Seluruh operasi pada fungsi bubble mensyaratkan masukan pohon yang memiliki warna yang normal pada awalnya sehingga hal ini mempengaruhi *precondition* dari fungsi removeMax dan fungsi remove yang sudah dibicarakan sebelumnya. Spesifikasi dari fungsi removeMax yang sudah dimodifikasi adalah

{-@ removeMax :: {x:CT a | not normalLeaf x}

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

Kemudian spesifikasi dari fungsi remove yang sudah dimodifikasi adalah

{-@ remove :: {x:CT a | not normalLeaf x}

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

## Hasil Verifikasi dan Analisis

Verifikasi dilakukan pada sumber kode yang sudah dijelaskan sebelumnya dan spesifikasi hasil analisis yang sudah dilakukan. Kode spesifikasi yang lengkap dapat dilihat pada <http://goto.ucsd.edu:8090/index.html#?demo=permalink%2F1626074411_36980.hs> atau pada Lampiran B. Sebagian besar kode pada program berhasil diterima oleh verifikasi namun ada 3 bagian dari program yang digagalkan oleh verifikasi.

1. Liquid Haskell tidak menerima verifikasi dari seluruh fungsi yang digunakan untuk verifikasi menggunakan *QuickCheck*. Hal ini dikarenakan banyaknya penggunaan fungsi-fungsi pembantu bawaan Haskell yang digunakan pada fungsi-fungsi tersebut yang mempersulit perlakuan verifikasi. Terlebih lagi beberapa bagian dari fungsi tersebut menggunakan fitur *monad* yang mempersulit penetapan *precondition* dan *postcondition* dari sebuah fungsi.

2. Fungsi prop\_BST tidak berhasil mengkodifikasi properti BST dalam *syntax* yang diterima oleh Liquid Haskell. *Syntax* dari Liquid Haskell tidak memiliki fungsi bantuan yang mumpuni untuk mengkodifikasi properti tersebut dalam sebuah fungsi pembantu. Satu-satunya cara yang diberikan oleh pemrogram Liquid Haskell adalah dengan mengkodifikasi properti tersebut dalam struktur data dari pohon itu sendiri namun hal itu tidak bisa dilakukan pada kasus ini karena parameter yang memiliki urutan yang tidak sesuai.

3. Baris terakhir dari fungsi balance tidak lolos dari verifikasi. Baris terakhir ini adalah kode yang digunakan untuk seluruh pohon yang sudah valid memenuhi properti RBT sehingga tidak perlu dilakukan perlakuan apa pun terhadap pohon tersebut untuk menghasilkan pohon yang valid. Namun, sistem verifikasi dari Liquid Haskell belum bisa mendeduksi bahwa jika sebuah pohon masukan tidak cocok dengan seluruh kriteria yang diberikan pada seluruh baris program sebelumnya, maka pohon tersebut pasti merupakan pohon yang sudah valid sebagai pohon RBT. Hal ini sepertinya merupakan hal yang cukup sulit untuk dideduksi secara otomatis karena bahkan sumber kode Weiritch yang sudah memverifikasi seluruh bagian dalam program secara menyeluruh tetap membiarkan baris terakhir ini dan menggunakan fungsi error jika program pernah meraih baris kode tersebut. Hal ini diperparah dengan sistem eliminasi dari Liquid Haskell yang memang belum terlalu sempurna sehingga pemrogram dari Liquid Haskell sendiri menyarankan agak pengguna Liquid Haskell tidak menggunakan fitur “no-totality” yang sudah ada dalam Liquid Haskell karena fitur tersebut masih sering menghasilkan hasil yang salah.

## Modifikasi Program untuk Memenuhi Verifikasi

Usaha verifikasi ini berusaha untuk melakukan verifikasi terhadap program tanpa melakukan perubahan sedikit pun terhadap sumber kode yang asli. Namun, kadang-kadang sumber kode bisa diubah untuk mempermudah usaha verifikasi atau diubah secara total untuk berfokus pada kemudahan verifikasi. Jika modifikasi program diizinkan dalam usaha verifikasi ini, maka beberapa modifikasi yang dapat dilakukan pada program adalah sebagaimana berikut.

1. Hilangkan seluruh kode yang berkaitan dengan verifikasi menggunakan *QuickCheck*.

2. Ubah urutan parameter pada struktur kode pohon sehingga properti RBT bisa dikodifikasi langsung pada kode tersebut. Jika parameter tersebut sudah disusun ulang, maka spesifikasi dapat dituliskan pada struktur kode pohon tersebut yang memiliki *syntax* sebagaimana berikut

-- | Trees with value less than X

{-@ type RBSL a X = RBSet {v:a | v < X} @-}

-- | Trees with value greater than X

{-@ type RBSR a X = RBSet {v:a | X < v} @-}

{-@ data RBSet a = E

| EE

| T { c :: Color

, key :: a

, lt :: RBSL a key

, rt :: RBSR a key

}

@-}

3. Hilangkan baris terakhir pada fungsi balance dan ganti baris tersebut dengan seluruh kemungkinan masukan pohon yang akan diterima. Jika hal ini dilakukan, maka *syntax* fungsi tersebut berubah menjadi sebagaimana berikut

balance :: Color -> a -> RBSet a -> RBSet a -> RBSet a

-- Okasaki's original cases:

balance B z (T R y (T R x a b) c) d = T R y (T B x a b) (T B z c d)

balance B z (T R x a (T R y b c)) d = T R y (T B x a b) (T B z c d)

balance B x a (T R z (T R y b c) d) = T R y (T B x a b) (T B z c d)

balance B x a (T R y b (T R z c d)) = T R y (T B x a b) (T B z c d)

-- Six cases for deletion:

balance BB z (T R y (T R x a b) c) d = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB z (T R x a (T R y b c)) d = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB x a (T R z (T R y b c) d) = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB x a (T R y b (T R z c d)) = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB x a (T NB z (T B y b c) d@(T B \_ \_ \_))

= T B y (T B x a b) (balance B z c (redden d))

balance BB z (T NB x a@(T B \_ \_ \_) (T B y b c)) d

= T B y (balance B x (redden a) b) (T B z c d)

balance color x a@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_))

b@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_)) = T color x a b

balance color x a@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_))

b@(T B \_ \_ \_) = T color x a b

balance color x a@(T B \_ \_ \_)

b@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_)) = T color x a b

balance color x a@(T B \_ \_ \_) b@(T B \_ \_ \_) = T color x a b

balance color x a@E b@E = T color x a b

Sumber kode yang sudah dimodifikasi dan spesifikasi yang sudah diubah untuk memenuhi kode tersebut dapat dilihat pada <http://goto.ucsd.edu:8090/index.html#?demo=permalink%2F1626854562_37428.hs> atau pada Lampiran C.

# KESIMPULAN DAN SARAN

## Kesimpulan

Pada tugas akhir ini, kesimpulan terkait dengan verifikasi implementasi algoritma Pohon Merah-Hitam Might adalah sebagai berikut:

* + - 1. Berdasarkan hasil analisis, implementasi RBT Might berhasil lolos verifikasi namun beberapa bagian dari kode tidak lolos dari verifikasi selain dengan modifikasi kode.
      2. Liquid Haskell dapat mempermudah dan mempersingkat beberapa bagian dari verifikasi dengan melakukan verifikasi terhadap bagian-bagian tersebut secara otomatis. Namun, keterbatasan *syntax* dari Liquid Haskell masih mencegah penulisan verifikasi yang lebih kompleks untuk kebutuhan penulisan spesifikasi yang lebih rumit yang sangat dibutuhkan untuk memverifikasi sumber kode yang digunakan dalam dunia nyata.

## Saran

Saran yang dapat diberikan untuk pengembangan selanjutnya pada topik tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

Percobaan verifikasi selanjutnya dapat dilakukan pada beberapa *library* resmi yang dimiliki oleh Haskell seperti IntMap yang sudah ditulis benar-benar secara fungsional. Hal ini akan mempermudah pemahaman dan akan membantu menjadi dasar untuk melakukan verifikasi terhadap sumber kode yang lebih kompleks.

Liquid Haskell memiliki beberapa fitur tambahan yang tidak dibahas dalam studi ini seperti *abstract refinements* atau *reflection*. Penggunaan dan pemahaman yang lebih paham terhadap fitur-fitur ini dapat membantu verifikasi yang lebih mendalam.

DAFTAR REFERENSI

Bayer, R. (1972). Symmetric binary B-Trees: Data structure and maintenance algorithms. *Acta Informatica*. https://doi.org/10.1007/BF00289509

Germane, K., & Might, M. (2014). Deletion: The curse of the red-black tree. *Journal of Functional Programming*, *24*(4), 423–433. https://doi.org/10.1017/S0956796814000227

Huth, M., & Ryan, M. (2004). *Logic in CS: Modelling and Reasoning about Systems* (Vol. 66, Issue 1).

Jhala, R. (2018). *The Hillelogram Verifier Rodeo I (LeftPad)*. https://ucsd-progsys.github.io/liquidhaskell-blog/2018/05/17/hillel-verifier-rodeo-I-leftpad.lhs/

Kahrs, S. (2001). Red-black trees with types. *Journal of Functional Programming*, *11*(4), 425–432. https://doi.org/10.1017/S0956796801004026

Krimgen, M. (2020). *Introduction to Red-Black Trees*. https://www.baeldung.com/cs/red-black-trees

Might, M. (2010). *The missing method: Deleting from Okasaki’s red-black trees*. http://matt.might.net/articles/red-black-delete/

Might, M. (2014). *An introduction to QuickCheck by example: Number theory and Okasaki’s red-black trees*. matt.might.net/articles/quick-quickcheck/

Okasaki, C. (1999). Functional pearl: Red-black trees in a functional setting. *Journal of Functional Programming*, *9*(4), 471–477. https://doi.org/10.1017/S0956796899003494

Peña, R. (2017). An introduction to liquid Haskell. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science, EPTCS*, *237*, 68–80. https://doi.org/10.4204/EPTCS.237.5

Rondon, P. M., Kawaguchi, M., & Jhala, R. (2008). Liquid types. *ACM SIGPLAN Notices*, *43*(6), 159–169. https://doi.org/10.1145/1379022.1375602

Sedgewick, R. (2008). Left-leaning Red-Black Trees. *Public Talk*, 8. http://www.cs.princeton.edu/~rs/talks/LLRB/LLRB.pdf

Vazou, N. (2016). Liquid Haskell: Haskell as a Theorem Prover. In *UCSD CS Department*. UC San Diego.

Vazou, N., Seidel, E. L., & Jhala, R. (2014). LiquidHaskell: Experience with refinement types in the real world. *Haskell 2014 - Proceedings of the 2014 ACM SIGPLAN Haskell Symposium*, *2*, 39–51. https://doi.org/10.1145/2633357.2633366

Weirich, S. (2014). *Implementation of deletion for red black trees by Matt Might; Editing to preserve the red/black tree invariants by Stephanie Weirich, Dan Licata and John Hughes*. https://github.com/sweirich/dth/blob/master/examples/red-black/MightRedBlackGADT.hs

1. Sumber Kode Implementasi Algoritma Penghapusan RBT Might
2. -- Implementation of deletion for red black trees by Matt Might
4. -- Original available from:
5. -- http://matt.might.net/articles/red-black-delete/code/RedBlackSet.hs
6. -- Slides:
7. -- http://matt.might.net/papers/might2014redblack-talk.pdf
8. -- Draft paper:
9. -- http://matt.might.net/tmp/red-black-pearl.pdf
11. module MightRedBlack where
13. import Prelude hiding (max)
14. import Control.Monad
15. import Test.QuickCheck hiding (elements)
16. import Data.List(nub,sort)
18. data Color =
19. R -- red
20. | B -- black
21. | BB -- double black
22. | NB -- negative black
23. deriving (Show, Eq)
25. data RBSet a =
26. E -- black leaf
27. | EE -- double black leaf
28. | T Color (RBSet a) a (RBSet a)
29. deriving (Show, Eq)
31. -- Private auxiliary functions --
33. redden :: RBSet a -> RBSet a
34. redden (T \_ a x b) = T R a x b
36. -- blacken for insert
37. -- never a leaf, could be red or black
38. blacken’ :: RBSet a -> RBSet a
39. blacken’ (T R a x b) = T B a x b
40. blacken’ (T B a x b) = T B a x b
42. -- blacken for delete
43. -- root is never red, could be double black
44. blacken :: RBSet a -> RBSet a
45. blacken (T B a x b) = T B a x b
46. blacken (T BB a x b) = T B a x b
47. blacken E = E
48. blacken EE = E
50. isBB :: RBSet a -> Bool
51. isBB EE = True
52. isBB (T BB \_ \_ \_) = True
53. isBB \_ = False
55. blacker :: Color -> Color
56. blacker NB = R
57. blacker R = B
58. blacker B = BB
59. blacker BB = error "too black"
61. redder :: Color -> Color
62. redder NB = error "not black enough"
63. redder R = NB
64. redder B = R
65. redder BB = B
67. blacker’ :: RBSet a -> RBSet a
68. blacker’ E = EE
69. blacker’ (T c l x r) = T (blacker c) l x r
71. redder’ :: RBSet a -> RBSet a
72. redder’ EE = E
73. redder’ (T c l x r) = T (redder c) l x r
75. -- `balance` rotates away coloring conflicts:
76. balance :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a
78. -- Okasaki’s original cases:
79. balance B (T R (T R a x b) y c) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)
80. balance B (T R a x (T R b y c)) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)
81. balance B a x (T R (T R b y c) z d) = T R (T B a x b) y (T B c z d)
82. balance B a x (T R b y (T R c z d)) = T R (T B a x b) y (T B c z d)
84. -- Six cases for deletion:
85. balance BB (T R (T R a x b) y c) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)
86. balance BB (T R a x (T R b y c)) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)
87. balance BB a x (T R (T R b y c) z d) = T B (T B a x b) y (T B c z d)
88. balance BB a x (T R b y (T R c z d)) = T B (T B a x b) y (T B c z d)
90. balance BB a x (T NB (T B b y c) z d@(T B \_ \_ \_))
91. = T B (T B a x b) y (balance B c z (redden d))
92. balance BB (T NB a@(T B \_ \_ \_) x (T B b y c)) z d
93. = T B (balance B (redden a) x b) y (T B c z d)
95. balance color a x b = T color a x b
97. -- `bubble` "bubbles" double-blackness upward toward the root:
98. bubble :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a
99. bubble color l x r
100. | isBB(l) || isBB(r) = balance (blacker color) (redder’ l) x (redder’ r)
101. | otherwise = balance color l x r



106. -- Public operations --
108. empty :: RBSet a
109. empty = E

112. member :: (Ord a) => a -> RBSet a -> Bool
113. member x E = False
114. member x (T \_ l y r) | x < y = member x l
115. | x > y = member x r
116. | otherwise = True

119. insert :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a
120. insert x s = blacken’ (ins s)
121. where ins E = T R E x E
122. ins s@(T color a y b) | x < y = balance color (ins a) y b
123. | x > y = balance color a y (ins b)
124. | otherwise = s

127. max :: RBSet a -> a
128. max E = error "no largest element"
129. max (T \_ \_ x E) = x
130. max (T \_ \_ x r) = max r
132. -- Remove this node: it might leave behind a double black node
133. remove :: RBSet a -> RBSet a
134. -- remove E = E -- impossible!
135. -- ; Leaves are easiest to kill:
136. remove (T R E \_ E) = E
137. remove (T B E \_ E) = EE
138. -- ; Killing a node with one child;
139. -- ; parent or child is red:
140. -- remove (T R E \_ child) = child
141. -- remove (T R child \_ E) = child
142. remove (T B E \_ (T R a x b)) = T B a x b
143. remove (T B (T R a x b) \_ E) = T B a x b
144. -- ; Killing a black node with one black child:
145. -- remove (T B E \_ child@(T B \_ \_ \_)) = blacker’ child
146. -- remove (T B child@(T B \_ \_ \_) \_ E) = blacker’ child
147. -- ; Killing a node with two sub-trees:
148. remove (T color l y r) = bubble color l’ mx r
149. where mx = max l
150. l’ = removeMax l
152. removeMax :: RBSet a -> RBSet a
153. removeMax E = error "no maximum to remove"
154. removeMax s@(T \_ \_ \_ E) = remove s
155. removeMax s@(T color l x r) = bubble color l x (removeMax r)
157. delete :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a
158. delete x s = blacken (del x s)
160. del x E = E
161. del x s@(T color a’ y b’) | x < y = bubble color (del x a’) y b’
162. | x > y = bubble color a’ y (del x b’)
163. | otherwise = remove s
165. prop\_del :: Int -> RBSet Int -> Bool
166. prop\_del x s = color (del x s) `elem` [B, BB]

169. --- Testing code
171. elements :: Ord a => RBSet a -> [a]
172. elements t = aux t [] where
173. aux E acc = acc
174. aux (T \_ a x b) acc = aux a (x : aux b acc)
176. instance (Ord a, Arbitrary a) => Arbitrary (RBSet a) where
177. arbitrary = liftM (foldr insert empty) arbitrary
179. prop\_BST :: RBSet Int -> Bool
180. prop\_BST t = isSortedNoDups (elements t)
182. color :: RBSet a -> Color
183. color (T c \_ \_ \_) = c
184. color E = B
185. color EE = BB
187. prop\_Rb2 :: RBSet Int -> Bool
188. prop\_Rb2 t = color t == B
190. prop\_Rb3 :: RBSet Int -> Bool
191. prop\_Rb3 t = fst (aux t) where
192. aux E = (True, 0)
193. aux (T c a x b) = (h1 == h2 && b1 && b2, if c == B then h1 + 1 else h1) where
194. (b1 , h1) = aux a
195. (b2 , h2) = aux b
197. prop\_Rb4 :: RBSet Int -> Bool
198. prop\_Rb4 E = True
199. prop\_Rb4 (T R a x b) = color a == B && color b == B && prop\_Rb4 a && prop\_Rb4 b
200. prop\_Rb4 (T B a x b) = prop\_Rb4 a && prop\_Rb4 b

203. isSortedNoDups :: Ord a => [a] -> Bool
204. isSortedNoDups x = nub (sort x) == x

207. prop\_delete\_spec1 :: RBSet Int -> Bool
208. prop\_delete\_spec1 t = all (\x -> not (member x (delete x t))) (elements t)
210. prop\_delete\_spec2 :: RBSet Int -> Bool
211. prop\_delete\_spec2 t = all (\(x,y) -> x == y || (member y (delete x t))) allpairs where
212. allpairs = [ (x,y) | x <- elements t, y <- elements t ]
214. prop\_delete\_spec3 :: RBSet Int -> Int -> Property
215. prop\_delete\_spec3 t x = not (x `elem` elements t) ==> (delete x t == t)
217. prop\_delete\_bst :: RBSet Int -> Bool
218. prop\_delete\_bst t = all (\x -> prop\_BST (delete x t)) (elements t)
220. prop\_delete2 :: RBSet Int -> Bool
221. prop\_delete2 t = all (\x -> prop\_Rb2 (delete x t)) (elements t)
223. prop\_delete3 :: RBSet Int -> Bool
224. prop\_delete3 t = all (\x -> prop\_Rb3 (delete x t)) (elements t)
226. prop\_delete4 :: RBSet Int -> Bool
227. prop\_delete4 t = all (\x -> prop\_Rb4 (delete x t)) (elements t)
229. check\_insert = do
230. putStrLn "BST property"
231. quickCheck prop\_BST
232. putStrLn "Root is black"
233. quickCheck prop\_Rb2
234. putStrLn "Black height the same"
235. quickCheck prop\_Rb3
236. putStrLn "Red nodes have black children"
237. quickCheck prop\_Rb4
239. check\_delete = do
240. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_spec1
241. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_spec2
242. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_spec3
243. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete2
244. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete3
245. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete4
246. quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_bst

249. main :: IO ()
250. main =
251. do
252. return $! ()
253. Sumber Kode dan Spesifikasi

-- Implementation of deletion for red black trees by Matt Might

-- Original available from:

-- http://matt.might.net/articles/red-black-delete/code/RedBlackSet.hs

-- Slides:

-- http://matt.might.net/papers/might2014redblack-talk.pdf

-- Draft paper:

-- http://matt.might.net/tmp/red-black-pearl.pdf

{-# LANGUAGE TypeApplications #-}

{-@ LIQUID "--no-termination" @-}

{-@ LIQUID "--no-totality" @-}

{-@ LIQUID "--exact-data" @-}

module MightRedBlack where

import Prelude hiding (max)

import Control.Monad

import Test.QuickCheck hiding (elements)

import Data.List(nub,sort)

data Color =

R -- red

| B -- black

| BB -- double black

| NB -- negative black

deriving (Show, Eq)

data RBSet a =

E -- black leaf

| EE -- double black leaf

| T Color (RBSet a) a (RBSet a)

deriving (Show, Eq)

-- Private auxiliary functions --

{-@ redden :: {x:CT a | color x == B}

-> {v:IM a | blackHeightL v == (blackHeightL x - 1) } @-}

redden :: RBSet a -> RBSet a

redden (T \_ a x b) = T R a x b

{-@ blacken' :: IM a -> RT a @-}

-- blacken for insert

-- never a leaf, could be red or black

blacken' :: RBSet a -> RBSet a

blacken' (T R a x b) = T B a x b

blacken' (T B a x b) = T B a x b

-- blacken for delete

-- root is never red, could be double black

{-@ blacken :: IM a -> RT a @-}

blacken :: RBSet a -> RBSet a

blacken (T B a x b) = T B a x b

blacken (T BB a x b) = T B a x b

blacken E = E

blacken EE = E

{-@ isBB :: rb : RBSet a -> { b : Bool | b <=> isBB' rb } @-}

isBB :: RBSet a -> Bool

isBB EE = True

isBB (T BB \_ \_ \_) = True

isBB \_ = False

{-@ blacker :: {x:Color | not tooBlack x}

-> {v:Color | colorValue v == (colorValue x + 1)} @-}

blacker :: Color -> Color

blacker NB = R

blacker R = B

blacker B = BB

blacker BB = error "too black"

{-@ redder :: {x:Color | not tooRed x}

-> {v:Color | (colorValue v == (colorValue x - 1))

&& ((x == BB) => (v == B)) } @-}

redder :: Color -> Color

redder NB = error "not black enough"

redder R = NB

redder B = R

redder BB = B

{-@ blacker' :: {x:RBSet a | not isBB' x} -> RBSet a @-}

blacker' :: RBSet a -> RBSet a

blacker' E = EE

blacker' (T c l x r) = T (blacker c) l x r

{-@ redder' :: {x:RBSet a | (prop\_IM x && isBB' x) || (prop\_CT x)}

-> {v:RBSet a | ((prop\_IM x && isBB' x && prop\_CT v) ||

(prop\_CT x && prop\_IM v))

&& (blackHeightL v == (blackHeightL x - 1)) } @-}

redder' :: RBSet a -> RBSet a

redder' EE = E

redder' (T c l x r) = T (redder c) l x r

-- `balance` rotates away coloring conflicts:

{-@ balance :: c:Color

-> {l:RBSet a | (prop\_IM l) || (prop\_CT l) }

-> x:a

-> {r:RBSet a | ((prop\_IM l && prop\_CT r) ||

(prop\_CT l && prop\_IM r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r)}

-> {v:RBSet a | ((c /= B && prop\_IM v) || prop\_CT v)

&& (blackHeightL v == (blackHeightL l + colorValue c))}

@-}

balance :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a

-- Okasaki's original cases:

balance B (T R (T R a x b) y c) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B (T R a x (T R b y c)) z d = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x (T R (T R b y c) z d) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

balance B a x (T R b y (T R c z d)) = T R (T B a x b) y (T B c z d)

-- Six cases for deletion:

balance BB (T R (T R a x b) y c) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB (T R a x (T R b y c)) z d = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T R (T R b y c) z d) = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T R b y (T R c z d)) = T B (T B a x b) y (T B c z d)

balance BB a x (T NB (T B b y c) z d@(T B \_ \_ \_))

= T B (T B a x b) y (balance B c z (redden d))

balance BB (T NB a@(T B \_ \_ \_) x (T B b y c)) z d

= T B (balance B (redden a) x b) y (T B c z d)

balance color a x b = T color a x b

-- `bubble` "bubbles" double-blackness upward:

{-@ bubble :: {c:Color | not (tooBlack c)}

-> {l:RBSet a | prop\_CT l || prop\_IM l}

-> x:a

-> {r:RBSet a | ((prop\_CT l && prop\_IM r) ||

(prop\_IM l && prop\_CT r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r) }

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL l + (colorValue c) }

@-}

bubble :: Color -> RBSet a -> a -> RBSet a -> RBSet a

bubble color l x r

| isBB(l) || isBB(r) = balance (blacker color) (redder' l) x (redder' r)

| otherwise = balance color l x r

-- Public operations --

{-@ empty :: {v:RT a | normalLeaf v} @-}

empty :: RBSet a

empty = E

{-@ member :: (Ord a) => a -> CT a -> Bool@-}

member :: (Ord a) => a -> RBSet a -> Bool

member x E = False

member x (T \_ l y r) | x < y = member x l

| x > y = member x r

| otherwise = True

{-@ insert :: (Ord a) => a -> RT a -> RT a @-}

--{-@ ins :: (Ord a) => x:CT a -> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

{-@ ins :: (Ord a) => x:IM a -> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

insert :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

insert x s = blacken' (ins s)

where ins E = T R E x E

ins s@(T color a y b) | x < y = balance color (ins a) y b

| x > y = balance color a y (ins b)

| otherwise = s

{-@ max :: {x:CT a | not normalLeaf x} -> a @-}

max :: RBSet a -> a

max E = error "no largest element"

max (T \_ \_ x E) = x

max (T \_ \_ x r) = max r

-- Remove this node: it might leave behind a double black node

{-@ remove :: {x:CT a | not normalLeaf x}

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

remove :: RBSet a -> RBSet a

-- remove E = E -- impossible!

-- ; Leaves are easiest to kill:

remove (T R E \_ E) = E

remove (T B E \_ E) = EE

-- ; Killing a node with one child;

-- ; parent or child is red:

-- remove (T R E \_ child) = child

-- remove (T R child \_ E) = child

remove (T B E \_ (T R a x b)) = T B a x b

remove (T B (T R a x b) \_ E) = T B a x b

-- ; Killing a black node with one black child:

-- remove (T B E \_ child@(T B \_ \_ \_)) = blacker' child

-- remove (T B child@(T B \_ \_ \_) \_ E) = blacker' child

-- ; Killing a node with two sub-trees:

remove (T color l y r) = bubble color l' mx r

where mx = max l

l' = removeMax l

{-@ removeMax :: {x:CT a | not normalLeaf x}

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

removeMax :: RBSet a -> RBSet a

removeMax E = error "no maximum to remove"

removeMax s@(T \_ \_ \_ E) = remove s

removeMax s@(T color l x r) = bubble color l x (removeMax r)

{-@ delete :: (Ord a) => a -> x:RT a -> v:RT a @-}

delete :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

delete x s = blacken (del x s)

{-@ del :: Ord a => a

-> x:CT a

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

del x E = E

del x s@(T color a' y b') | x < y = bubble color (del x a') y b'

| x > y = bubble color a' y (del x b')

| otherwise = remove s

{-@ prop\_del :: Int -> RT Int -> Bool @-}

prop\_del :: Int -> RBSet Int -> Bool

prop\_del x s = color (del x s) `elem` [B, BB]

--- Testing code

{-@ elements :: Ord a => RT a -> [a] @-}

elements :: Ord a => RBSet a -> [a]

elements t = aux t [] where

aux E acc = acc

aux (T \_ a x b) acc = aux a (x : aux b acc)

instance (Ord a, Arbitrary a) => Arbitrary (RBSet a) where

arbitrary = liftM (foldr @[] insert empty) arbitrary

{-@ prop\_BST :: x:RT Int -> {v:Bool | v <=> prop\_BST' x} @-}

prop\_BST :: RBSet Int -> Bool

prop\_BST t = isSortedNoDups (elements t)

color :: RBSet a -> Color

color (T c \_ \_ \_) = c

color E = B

color EE = BB

{-@ prop\_Rb2 :: x:RT Int -> {v:Bool | v <=> blackRoot x} @-}

prop\_Rb2 :: RBSet Int -> Bool

prop\_Rb2 t = color t == B

{-@ prop\_Rb3 :: x:RT Int -> {v:Bool | v <=> validBlackHeight x} @-}

prop\_Rb3 :: RBSet Int -> Bool

prop\_Rb3 t = fst (aux t) where

aux E = (True, 0)

aux (T c a x b) = (h1 == h2 && b1 && b2, if c == B then h1 + 1 else h1) where

(b1 , h1) = aux a

(b2 , h2) = aux b

{-@ prop\_Rb4 :: x:RBSet Int -> {v:Bool | v <=> redChildIsBlack x} @-}

prop\_Rb4 :: RBSet Int -> Bool

prop\_Rb4 E = True

prop\_Rb4 (T R a x b) = color a == B && color b == B && prop\_Rb4 a && prop\_Rb4 b

prop\_Rb4 (T B a x b) = prop\_Rb4 a && prop\_Rb4 b

isSortedNoDups :: Ord a => [a] -> Bool

isSortedNoDups x = nub (sort x) == x

{-@ prop\_delete\_spec1 :: RT Int -> Bool @-}

prop\_delete\_spec1 :: RBSet Int -> Bool

prop\_delete\_spec1 t = all (\x -> not (member x (delete x t))) (elements t)

{-@ prop\_delete\_spec2 :: RT Int -> Bool @-}

prop\_delete\_spec2 :: RBSet Int -> Bool

prop\_delete\_spec2 t = all (\(x,y) -> x == y || (member y (delete x t))) allpairs where

allpairs = [ (x,y) | x <- elements t, y <- elements t ]

{-@ prop\_delete\_spec3 :: RT Int -> Int -> Property @-}

prop\_delete\_spec3 :: RBSet Int -> Int -> Property

prop\_delete\_spec3 t x = not (x `elem` elements t) ==> (delete x t == t)

{-@ prop\_delete\_bst :: RT Int -> Bool @-}

prop\_delete\_bst :: RBSet Int -> Bool

prop\_delete\_bst t = all (\x -> prop\_BST (delete x t)) (elements t)

{-@ prop\_delete2 :: RT Int -> Bool @-}

prop\_delete2 :: RBSet Int -> Bool

prop\_delete2 t = all (\x -> prop\_Rb2 (delete x t)) (elements t)

{-@ prop\_delete3 :: RT Int -> Bool @-}

prop\_delete3 :: RBSet Int -> Bool

prop\_delete3 t = all (\x -> prop\_Rb3 (delete x t)) (elements t)

{-@ prop\_delete4 :: RT Int -> Bool @-}

prop\_delete4 :: RBSet Int -> Bool

prop\_delete4 t = all (\x -> prop\_Rb4 (delete x t)) (elements t)

check\_insert = do

putStrLn "BST property"

quickCheck prop\_BST

putStrLn "Root is black"

quickCheck prop\_Rb2

putStrLn "Black height the same"

quickCheck prop\_Rb3

putStrLn "Red nodes have black children"

quickCheck prop\_Rb4

check\_delete = do

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_spec1

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_spec2

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_spec3

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete2

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete3

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete4

quickCheckWith (stdArgs {maxSuccess=100}) prop\_delete\_bst

main :: IO ()

main =

do

return $! ()

-- Helper functions for verification

{-@ measure color @-}

{-@ measure normalLeaf @-}

normalLeaf :: RBSet a -> Bool

normalLeaf E = True

normalLeaf \_ = False

{-@ inline blackRoot @-}

blackRoot :: RBSet a -> Bool

blackRoot t = color t == B

{-@ inline noSpecialColor @-}

{-@ noSpecialColor :: x:RBSet a -> {v:Bool | (v => noSpecialChild x)

&& (v => not (isBB' x)) }

@-}

noSpecialColor :: RBSet a -> Bool

noSpecialColor t = (color t /= BB)

&& (color t /= NB)

&& noSpecialChild t

{-@ measure noSpecialChild @-}

noSpecialChild :: RBSet a -> Bool

noSpecialChild (T \_ l \_ r) = noSpecialColor l && noSpecialColor r

noSpecialChild \_ = True

{-@ measure redChildIsBlack @-}

{-@ redChildIsBlack :: x:RBSet a -> {v:Bool | v => redChildIsBlackNT x} @-}

redChildIsBlack :: RBSet a -> Bool

redChildIsBlack E = True

redChildIsBlack EE = True

redChildIsBlack (T R a x b) = color a == B &&

color b == B &&

redChildIsBlack a && redChildIsBlack b

redChildIsBlack (T \_ a x b) = redChildIsBlack a && redChildIsBlack b

{-@ measure redChildIsBlackNT @-}

redChildIsBlackNT :: RBSet a -> Bool

redChildIsBlackNT (T \_ l \_ r) = redChildIsBlack l && redChildIsBlack r

redChildIsBlackNT \_ = True

{-@ measure colorValue @-}

colorValue :: Color -> Int

colorValue NB = -1

colorValue R = 0

colorValue B = 1

colorValue BB = 2

{-@ measure blackHeightL @-}

{-@ blackHeightL :: {x:RBSet a | noSpecialColor x} -> { i : Int | i >= 1} @-}

blackHeightL :: RBSet a -> Int

blackHeightL (T c l \_ \_) = blackHeightL l + colorValue c

blackHeightL t = colorValue $ color t

{-@ measure validBlackHeight @-}

{-@ validBlackHeight :: {x:RBSet a | noSpecialChild x} -> Bool @-}

validBlackHeight :: RBSet a -> Bool

validBlackHeight E = True

validBlackHeight EE = True

validBlackHeight (T \_ l \_ r) = validBlackHeight l && validBlackHeight r

&& blackHeightL l == blackHeightL r

{-@ inline prop\_CT @-}

{-@ prop\_CT :: {x:RBSet a | noSpecialColor x}

-> {v:Bool | v => prop\_IM x} @-}

{-@ invariant {t:RBSet a | prop\_CT t => prop\_IM t} @-}

prop\_CT :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_CT t = noSpecialColor t

&& redChildIsBlack t

&& validBlackHeight t

-- && prop\_BST' t

{-@ type CT a = {v:RBSet a | prop\_CT v} @-}

{-@ inline prop\_RBSet @-}

{-@ prop\_RBSet :: {x:RBSet a | noSpecialColor x}

-> {v:Bool | v => prop\_CT x} @-}

prop\_RBSet :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_RBSet t = prop\_CT t

&& blackRoot t

{-@ type RT a = {v:RBSet a | prop\_RBSet v} @-}

{-@ inline prop\_IM @-}

{-@ prop\_IM :: {x:RBSet a | noSpecialChild x} -> Bool @-}

prop\_IM t = noSpecialChild t

&& redChildIsBlackNT t

&& validBlackHeight t

-- && prop\_BST' t

{-@ type IM a = {v:RBSet a | prop\_IM v} @-}

{-@ measure tooBlack @-}

tooBlack :: Color -> Bool

tooBlack BB = True

tooBlack \_ = False

{-@ measure tooRed @-}

tooRed :: Color -> Bool

tooRed NB = True

tooRed \_ = False

{-@ inline isBB' @-}

isBB' t = color t == BB

{-@ measure prop\_BST' @-}

prop\_BST' :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_BST' (T \_ l@(T \_ \_ xl \_) x

r@(T \_ \_ xr \_)) = (xl < x) && (x < xr)

&& prop\_BST' l

&& prop\_BST' r

prop\_BST' (T \_ l@(T \_ \_ xl \_) x r) = (xl < x)

&& prop\_BST' l

&& prop\_BST' r

prop\_BST' (T \_ l x r@(T \_ \_ xr \_)) = (x < xr)

&& prop\_BST' l

&& prop\_BST' r

prop\_BST' (T \_ l x r) = prop\_BST' l && prop\_BST' r

prop\_BST' \_ = True

1. Sumber Kode yang telah Dimodifikasi beserta Spesifikasi

-- Implementation of deletion for red black trees by Matt Might

-- Original available from:

-- http://matt.might.net/articles/red-black-delete/code/RedBlackSet.hs

-- Slides:

-- http://matt.might.net/papers/might2014redblack-talk.pdf

-- Draft paper:

-- http://matt.might.net/tmp/red-black-pearl.pdf

{-# LANGUAGE TypeApplications #-}

{-@ LIQUID "--no-termination" @-}

{-@ LIQUID "--no-totality" @-}

{-@ LIQUID "--exact-data" @-}

module MightRedBlack where

import Prelude hiding (max)

import Control.Monad

import Test.QuickCheck hiding (elements)

import Data.List(nub,sort)

data Color =

R -- red

| B -- black

| BB -- double black

| NB -- negative black

deriving (Show, Eq)

data RBSet a =

E -- black leaf

| EE -- double black leaf

| T Color a (RBSet a) (RBSet a)

deriving (Show, Eq)

-- Private auxiliary functions --

{-@ redden :: {x:CT a | color' x == B}

-> {v:IM a | blackHeightL v == (blackHeightL x - 1) } @-}

redden :: RBSet a -> RBSet a

redden (T \_ x a b) = T R x a b

{-@ blacken' :: IM a -> RT a @-}

-- blacken for insert

-- never a leaf, could be red or black

blacken' :: RBSet a -> RBSet a

blacken' (T R x a b) = T B x a b

blacken' (T B x a b) = T B x a b

-- blacken for delete

-- root is never red, could be double black

{-@ blacken :: IM a -> RT a @-}

blacken :: RBSet a -> RBSet a

blacken (T B x a b) = T B x a b

blacken (T BB x a b) = T B x a b

blacken E = E

blacken EE = E

{-@ isBB :: rb : RBSet a -> { b : Bool | b <=> isBB' rb } @-}

isBB :: RBSet a -> Bool

isBB EE = True

isBB (T BB \_ \_ \_) = True

isBB \_ = False

{-@ blacker :: {x:Color | not tooBlack x}

-> {v:Color | colorValue v == (colorValue x + 1)} @-}

blacker :: Color -> Color

blacker NB = R

blacker R = B

blacker B = BB

blacker BB = error "too black"

{-@ redder :: {x:Color | not tooRed x}

-> {v:Color | (colorValue v == (colorValue x - 1))

&& ((x == BB) => (v == B)) } @-}

redder :: Color -> Color

redder NB = error "not black enough"

redder R = NB

redder B = R

redder BB = B

{-@ blacker' :: {x:RBSet a | canBeBlacker x} -> RBSet a @-}

blacker' :: RBSet a -> RBSet a

blacker' E = EE

blacker' (T c x l r) = T (blacker c) x l r

{-@ redder' :: {x:RBSet a | (prop\_IM x && isBB' x) || (prop\_CT x)}

-> {v:RBSet a | ((prop\_IM x && isBB' x && prop\_CT v) ||

(prop\_CT x && prop\_IM v))

&& (blackHeightL v == (blackHeightL x - 1)) } @-}

redder' :: RBSet a -> RBSet a

redder' EE = E

redder' (T c x l r) = T (redder c) x l r

-- `balance` rotates away coloring conflicts:

{-@ balance :: c:Color

-> x:a

-> {l:RBSL a x | (prop\_IM l) || (prop\_CT l) }

-> {r:RBSR a x | ((prop\_IM l && prop\_CT r) ||

(prop\_CT l && prop\_IM r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r) }

-> {v:RBSet a | ((c /= B && prop\_IM v) || prop\_CT v)

&& (blackHeightL v == (blackHeightL l + colorValue c))}

@-}

-- beware beware blackHeight still dont accept NB

balance :: Color -> a -> RBSet a -> RBSet a -> RBSet a

--{- uncomment this for faster verification

-- Okasaki's original cases:

balance B z (T R y (T R x a b) c) d = T R y (T B x a b) (T B z c d)

balance B z (T R x a (T R y b c)) d = T R y (T B x a b) (T B z c d)

balance B x a (T R z (T R y b c) d) = T R y (T B x a b) (T B z c d)

balance B x a (T R y b (T R z c d)) = T R y (T B x a b) (T B z c d)

-- Six cases for deletion:

balance BB z (T R y (T R x a b) c) d = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB z (T R x a (T R y b c)) d = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB x a (T R z (T R y b c) d) = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB x a (T R y b (T R z c d)) = T B y (T B x a b) (T B z c d)

balance BB x a (T NB z (T B y b c) d@(T B \_ \_ \_))

= T B y (T B x a b) (balance B z c (redden d))

balance BB z (T NB x a@(T B \_ \_ \_) (T B y b c)) d

= T B y (balance B x (redden a) b) (T B z c d)

---}

balance color x a@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_))

b@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_)) = T color x a b

balance color x a@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_))

b@(T B \_ \_ \_) = T color x a b

balance color x a@(T B \_ \_ \_)

b@(T R \_ (T B \_ \_ \_) (T B \_ \_ \_)) = T color x a b

balance color x a@(T B \_ \_ \_) b@(T B \_ \_ \_) = T color x a b

balance color x a@E b@E = T color x a b

--balance color x a b = T color x a b

-- `bubble` "bubbles" double-blackness upward:

{-@ bubble :: {c:Color | not (tooBlack c)}

-> x:a

-> {l:RBSL a x | prop\_CT l || prop\_IM l}

-> {r:RBSR a x | ((prop\_CT l && prop\_IM r) ||

(prop\_IM l && prop\_CT r))

&& (blackHeightL l == blackHeightL r) }

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL l + (colorValue c) }

@-}

bubble :: Color -> a -> RBSet a -> RBSet a -> RBSet a

bubble color x l r

| isBB(l) || isBB(r) = balance (blacker color) x (redder' l) (redder' r)

| otherwise = balance color x l r

-- Public operations --

{-@ empty :: {v:RT a | normalLeaf v} @-}

empty :: RBSet a

empty = E

{-@ member :: (Ord a) => a -> CT a -> Bool@-}

member :: (Ord a) => a -> RBSet a -> Bool

member x E = False

member x (T \_ y l r) | x < y = member x l

| x > y = member x r

| otherwise = True

{-@ insert :: (Ord a) => a -> RT a -> RT a @-}

insert :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

insert x s = blacken' (ins x s)

{-@ ins :: (Ord a) => a

-> x:CT a

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

ins x E = T R x E E

ins x s@(T color y a b) | x < y = balance color y (ins x a) b

| x > y = balance color y a (ins x b)

| otherwise = s

-- Remove this node: it might leave behind a double black node

{-@ remove :: {x:CT a | not normalLeaf x}

-> {v:IM {w:a | (normalLeaf (rt' x)) => (w < key' x) }

| blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

remove :: RBSet a -> RBSet a

-- remove E = E -- impossible!

-- ; Leaves are easiest to kill:

remove (T R \_ E E) = E

remove (T B \_ E E) = EE

-- ; Killing a node with one child;

-- ; parent or child is red:

-- remove (T R \_ E child) = child

remove (T R \_ child E) = child --

remove (T B \_ E (T R a x b)) = T B a x b

remove (T B \_ (T R a x b) E) = T B a x b

-- ; Killing a black node with one black child:

-- remove (T B \_ E child@(T B \_ \_ \_)) = blacker' child

remove (T B \_ child@(T B \_ \_ \_) E) = blacker' child --

-- ; Killing a node with two sub-trees:

remove (T color y l r) = bubble color mx l' r

where

(mx, l') = getMax l

-- where mx = max l

-- l' = removeMax l

{-@ getMax :: {x:CT a | not normalLeaf x}

-> (m :: a,

{v : IM {w : a | (w < m)} | blackHeightL v == blackHeightL x})

@-}

getMax :: RBSet a -> (a, RBSet a)

getMax s@(T \_ m l E) = (m, remove s)

getMax s@(T c x l r) = case getMax r of (m, r') -> (m, bubble c x l r')

{-@ delete :: (Ord a) => a -> x:RT a -> v:RT a @-}

delete :: (Ord a) => a -> RBSet a -> RBSet a

delete x s = blacken (del x s)

{-@ del :: Ord a => a

-> x:CT a

-> {v:IM a | blackHeightL v == blackHeightL x} @-}

del x E = E

del x s@(T color y a' b') | x < y = bubble color y (del x a') b'

| x > y = bubble color y a' (del x b')

| otherwise = remove s

{-@ color :: x:RBSet a -> {c:Color | c = color' x} @-}

color :: RBSet a -> Color

color (T c \_ \_ \_) = c

color E = B

color EE = BB

main :: IO ()

main =

do

return $! ()

-- Helper functions for verification

-- | Trees with value less than X

{-@ type RBSL a X = RBSet {v:a | v < X} @-}

-- | Trees with value greater than X

{-@ type RBSR a X = RBSet {v:a | X < v} @-}

{-@ data RBSet a = E

| EE

| T { c :: Color

, key :: a

, lt :: RBSL a key

, rt :: RBSR a key

}

@-}

{-@ type True = {v:Bool | v} @-}

{-@ type False = {v:Bool | not v} @-}

{-@ measure color' @-}

color' :: RBSet a -> Color

color' (T c \_ \_ \_) = c

color' E = B

color' EE = BB

{-@ measure normalLeaf @-}

normalLeaf :: RBSet a -> Bool

normalLeaf E = True

normalLeaf \_ = False

{-@ inline blackRoot @-}

blackRoot :: RBSet a -> Bool

blackRoot t = color' t == B

{-@ inline noSpecialColor @-}

{-@ noSpecialColor :: x:RBSet a -> {v:Bool | (v => noSpecialChild x)

&& (v => not (isBB' x)) }

@-}

noSpecialColor :: RBSet a -> Bool

noSpecialColor t = (color' t /= BB)

&& (color' t /= NB)

&& noSpecialChild t

{-@ measure noSpecialChild @-}

noSpecialChild :: RBSet a -> Bool

noSpecialChild (T \_ \_ l r) = noSpecialColor l && noSpecialColor r

noSpecialChild \_ = True

{-@ measure redChildIsBlack @-}

{-@ redChildIsBlack :: x:RBSet a

-> {v:Bool | (v => redChildIsBlackNT x)

&& (((color' x == B) && (redChildIsBlackNT x))

=> v)} @-}

redChildIsBlack :: RBSet a -> Bool

redChildIsBlack E = True

redChildIsBlack EE = True

redChildIsBlack (T R \_ l r) = color' l == B

&& color' r == B

&& redChildIsBlack l && redChildIsBlack r

redChildIsBlack (T \_ \_ l r) = redChildIsBlack l && redChildIsBlack r

{-@ measure redChildIsBlackNT @-}

redChildIsBlackNT :: RBSet a -> Bool

redChildIsBlackNT (T \_ \_ l r) = redChildIsBlack l && redChildIsBlack r

redChildIsBlackNT \_ = True

{-@ measure colorValue @-}

colorValue :: Color -> Int

colorValue NB = -1

colorValue R = 0

colorValue B = 1

colorValue BB = 2

{-@ measure blackHeightL @-}

{-@ blackHeightL :: {x:RBSet a | noSpecialColor x} -> { i : Int | i >= 1} @-}

blackHeightL :: RBSet a -> Int

blackHeightL (T c \_ l \_) = blackHeightL l + colorValue c

blackHeightL t = colorValue $ color' t

{-@ measure validBlackHeight @-}

{-@ validBlackHeight :: {x:RBSet a | noSpecialChild x} -> Bool @-}

validBlackHeight :: RBSet a -> Bool

validBlackHeight E = True

validBlackHeight EE = True

validBlackHeight (T \_ \_ l r) = validBlackHeight l && validBlackHeight r

&& blackHeightL l == blackHeightL r

{-@ inline prop\_CT @-}

{-@ prop\_CT :: {x:RBSet a | noSpecialColor x}

-> {v:Bool | (v => prop\_IM x)

&& (((color' x == B) && prop\_IM x) => v)} @-}

{-@ invariant {t:RBSet a | prop\_CT t => prop\_IM t} @-}

prop\_CT :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_CT t = noSpecialColor t

&& redChildIsBlack t

&& validBlackHeight t

{-@ type CT a = {v:RBSet a | prop\_CT v} @-}

{-@ inline prop\_RBSet @-}

{-@ prop\_RBSet :: {x:RBSet a | noSpecialColor x}

-> {v:Bool | v => prop\_CT x} @-}

prop\_RBSet :: (Ord a) => RBSet a -> Bool

prop\_RBSet t = prop\_CT t

&& blackRoot t

{-@ type RT a = {v:RBSet a | prop\_RBSet v} @-}

{-@ inline prop\_IM @-}

{-@ prop\_IM :: {x:RBSet a | noSpecialChild x} -> Bool @-}

prop\_IM t = noSpecialChild t

&& redChildIsBlackNT t

&& validBlackHeight t

{-@ type IM a = {v:RBSet a | prop\_IM v} @-}

{-@ measure tooBlack @-}

tooBlack :: Color -> Bool

tooBlack BB = True

tooBlack \_ = False

{-@ measure tooRed @-}

tooRed :: Color -> Bool

tooRed NB = True

tooRed \_ = False

{-@ inline canBeBlacker @-}

canBeBlacker x = color' x /= BB

{-@ inline isBB' @-}

isBB' t = color' t == BB

{-@ measure key' @-}

key' :: RBSet a -> a

key' (T \_ x \_ \_) = x

{-@ measure rt' @-}

rt' :: RBSet a -> RBSet a

rt' (T \_ \_ \_ r) = r