Mekanisme/Metode Menjamin *Integrity* Pada File Digital dan Analisis Algoritmanya

Aaron Christopher Tanhar (07211940000055)
Departemen Teknik Komputer
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, Indonesia 60111
christopher.19072@mhs.its.ac.id

***Abstrak*—Integritas dari sebuah File Digital merupakan salah satu aspek penting dari sekuriti sistem komputer. Terdapat instilah yang dinamakan dengan File Integrity Monitoring (FIM) yang merupakan sebuah proses yang melakukan tindakan validasi dari sebuah File pada Operating System dan software aplikasi menggunakan metode verifikasi antara state atau keadaan yang terkini dengan state yang diketahui atau sebelumnya. Tentu saja hal tersebut penting untuk dilakukan sehingga file-file yang selalu kita transmisikan baik melalui lokal komputer dan melalui nirkabel akan selalu terjamin isinya sehingga tidak korup. Apabila tidak demikian maka mungkin dapat terjadi kerusakan atau pemalsuan data. Maka pada makalah ini saya melakukan riset terhadap metode yang dapat menjamin integritas pada file digital di sistem komputer.**

***Kata kunci*—*Integrity*, *Security*, Komputer, File.**

I. Pendahuluan

Integritas dari File Digital merupakan salah satu aspek penting dari sekuriti sistem komputer. File adalah aspek penting dari sebuah OS karena digunakan untuk melakukan I/O serta interaksi user dengan OS [1]. Pada *UNIX-like OS* sendiri file adalah segalanya, dan segalanya adalah file, seperti yang dikatakan oleh perintis Kernel Linux, Linus Torvalds [2]. Maka dari itu, file ini penting sekali untuk dilindungi untuk menjaga integritas dan *availability* dari *service* yang dilakukan oleh file yang bersangkutan tersebut. Menjaga integritas file penting dilakukan masa kini karena banyaknya instruksi dan data pada komputer. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan terjadinya modifikasi data yang tidak terduga maupun yang tidak *authorized*. Sebuah data atau file dapat menjadi korup apabila terjadi malfungsi pada *hardware* atau *software*. Disk yang digunakan pada komputer bisa saja menjadi penyebab. Error pada disk merupakan sesuatu yang lumrah terjadi [3] dan biasanya *software* penyimpanan tidak didesain untuk menangani error tersebut. Bahkan dengan kesalahan integritas kecil sekalipun, yang tidak dapat dideteksi oleh *software* dengan tepat waktu, dapat membuat hilangnya data secara signifikan.

Terdapat beberapa cara atau metode untuk menjamin integritas dari sebuah file. *Parity Bit* atau biasa juga disebut dengan *Check Bit* adalah bentuk sederhana dari *error detecting code*. Error detecting code ini biasa digunakan untuk melakukan transmisi digital data yang *reliable* dengan menggunakan kanal komunikasi yang *unreliable*. Semua bentuk error detection akan menambahkan beberapa data ekstra pada pesan, yang dapat digunakan oleh penerima untuk melakukan verifikasi dari konsitensi pada pesan tersebut. Parity bit akan memastikan bahwa jumlah total dari 1-bit pada sebuah string adalah ganjil atau genap [4].

Pembahasan pada paper ini dimulai dengan presentasi mengenai penelitian lain (Bagian III). Kemudian dilanjutkan dengan penjelasan mengenai arsitektur dari sistem yang dibuat (Bagian IV). Berdasarkan hal tersebut, kami menunjukkan lorem ipsum (Bagian V). Terakhir, didapatkan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan (Bagian VI).

II. Penelitian Terkait

Dari segi security, terdapat beberapa penelitian yang juga melibatkan perkara *file integrity*. Beberapa diantaranya akan dibahas sekilas pada subbab berikut.

A. File Integrity Verification

Beberapa penelitian dengan metode survei online telah mempelajari tentang security dan usability dari fingerprint berbeda untuk autentikasi maupun verifikasi integritas. Hsiao et al, sudah membandingkan kecepatan dan akurasi dari hash verification dengan representasi visual dan textual yang berbeda [5]. Pada penelitiannya disebut bahwa user kesulitan dalam membandingkan fingerprint yang panjang.

Penelitian dengan tema secure messaging juga memberikan kita penemuan yang relevan tentang usability dan security dari proses autentikasi pengguna layanan messaging tersebut. Unger et al, menekankan bahwa tingkat penggunaan dan usability yang terbatas dari verifikasi fingerprint secara manual [6]. Vaziripour et al, mengevaluasi usability dari proses autentikasi yang ada di tiga aplikasi messaging populer (WhatsApp, Viber, Facebook Messenger) melalui penelitian dua tahap yang melibatkan 36 pasang peserta [7]. Peserta melaporkan bahwa string fingerprint terlalu panjang, dan beberapa pengguna WhatsApp senang dengan fitur scan QR code daripada harus membandingkan string yang panjang.

B. Otomatisasi Verifikasi Integritas

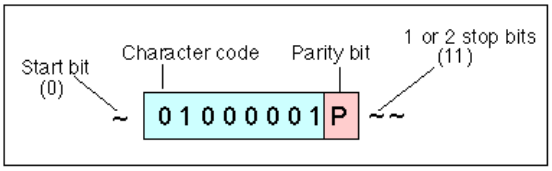
Kita dapat melakukan otomatisasi verifikasi checksum. Beberapa diantaranya sudah diaplikasikan. Pada package manager UNIX OS seperti brew (macOS) ataupun aptitude (Linux)

telah diterapkan verifikasi checksum otomatis, yang mempermudah user untuk dapat langsung menginstall package tanpa perlu membandingkan checksum pada source dan yang diunduh secara manual karena pada package manager sudah otomatis melakukan hal tersebut. Akan tetapi, package manager seperti yang disebutkan sebelumnya biasanya hanya populer di UNIX system dan package manager biasanya digunakan untuk user yang sudah berpengalaman dengan terminal atau *command line interface*. Perlu diperhatikan bahwa package manager juga tidak luput dari serangan [8].

III. Parity Bit

Pada ilmu Matematika, paritas merupakan sebuah properti dari sebuah *integer* yang menentukan apabila *integer* tersebut ganjil atau genap. Sebuah paritas dari bilangan bulat adalah genap apabila jika bilangan tersebut dapat dibagi dengan dua dan sisanya adalah nol. Sebaliknya jika sisanya satu maka paritasnya adalah ganjil. *Parity Bit* atau biasa juga disebut dengan *Check Bit* adalah bentuk sederhana dari *error detecting code*. Error detecting code ini biasa digunakan untuk melakukan transmisi digital data yang *reliable* dengan menggunakan kanal komunikasi yang *unreliable*. Semua bentuk error detection akan menambahkan beberapa data ekstra pada pesan, yang dapat digunakan oleh penerima untuk melakukan verifikasi dari konsitensi pada pesan tersebut. *Parity bit* akan memastikan bahwa jumlah total dari 1-bit pada sebuah string adalah ganjil atau genap [4].

Terdapat dua varian dari bit paritas, paritas genap dan paritas ganjil. Pada kasus paritas genap, untuk setiap bit dari string yang diberikan, jumlah bit yang bernilai 1 akan dihitung. Apabila jumlahnya ganjil, maka nilai dari bit paritas akan diatur menjadi 1, yang membuat total bit 1 menjadi bernilai genap. Sebaliknya, jika jumlah dari bit 1 pada awalnya sudah genap, maka bit paritas akan diatur menjadi 0. Pada kasus paritas ganjil, prosedurnya akan berkebalikan. Untuk setiap bit dari string yang diberikan, jumlah bit yang bernilai 1 akan dihitung. Apabila jumlahnya genap, maka nilai dari bit paritas akan diatur menjadi 1, yang membuat total bit 1 menjadi bernilai ganjil. Sebaliknya, jika jumlah dari bit 1 pada awalnya sudah ganjil, maka bit paritas akan diatur menjadi 0.



Gambar 1. Struktur parity bit

Apabila sebuah string yang berisi bit-bit paritas ditransmisikan secara tidak benar atau korup, maka bit paritasnya akan salah. Hal tersebut mengindikasikan terjadinya *parity error* saat transmisi. Bit paritas ini hanya bisa mendeteksi adanya error; tidak dapat melakukan koreksi error pada file yang terjadi, karena tidak ada mekanisme yang memungkinkan bit paritas untuk mengetahui bit yang mana yang korup. Lalu

Tabel I
Contoh bit paritas

7 bits of data	Count of 1 bits	8 bits including parity even	8 bits including parity odd
0000000	0	00000000	00000001
1010001	3	10100011	10100010
1101001	4	11010010	11010011
1111111	7	11111111	11111110

apabila meninjau Tabel I, dapat diketahui bahwa bit paritas ini memiliki kelemahan. Bit paritas hanya mengecek jumlah bit ganjil atau genap tanpa meninjau jumlah asli bitnya. Hal ini mengakibatkan terjadinya kegagalan dalam menangkap error pada data. Sebagai contoh, jika A ingin mengirim data `1001` dengan paritas genap maka bit paritasnya adalah `0` sehingga yang ditransmisikan ke B adalah `10010`. Terjadi error pada transmisi, sehingga yang sampai ke B adalah `11011`. Akan tetapi, B menghitung jumlah bit dan mendapati genap, sehingga B akan menganggap data tersebut benar walaupun sebenarnya salah.

```
def even_parity(x):
    parity = 0
    while x:
        parity ^= x & 1
        x >>= 1
    return parity
```

Listing 1. Program perhitungan bit paritas genap.

```
def odd_parity(x):
    parity = 1
    while x:
        parity ^= x & 1
        x >>= 1
    return parity
```

Listing 2. Program perhitungan bit paritas ganjil

Potongan kode pada Listing 1 diatas adalah contoh kode yang berfungsi menemukan bit paritas genap. Untuk bit paritas ganjil tinggal mengganti inisialisasi variabel parity menjadi 1. Inputnya adalah *integer* yang bisa kita jadikan biner dulu, seperti `0b10001`.

IV. Checksum

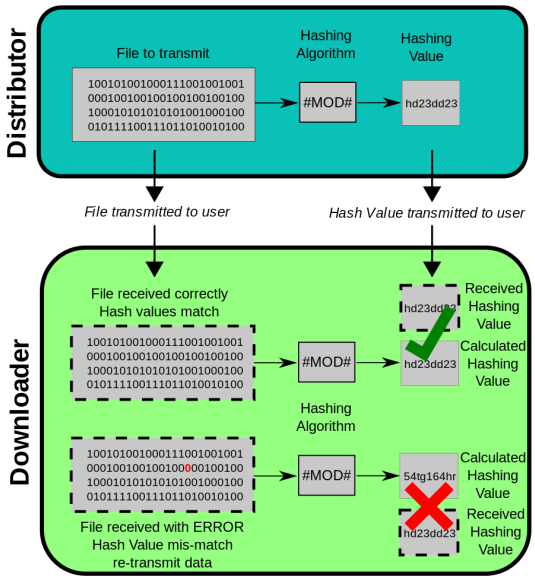
Sebuah checksum merupakan suatu blok data berukuran kecil yang diperoleh dari blok data digital yang lainnya. Checksum memiliki tujuan untuk mendeteksi error yang mungkin saja terjadi ketika melakukan transmisi data pada memori maupun internet. Checksum biasanya digunakan untuk verifikasi *integrity* dari sebuah data, dengan kata lain apakah datanya sudah dimodifikasi setelah checksum dibuat. Output dari sebuah algoritma fungsi *hash cryptographic*, yang biasa disebut *hashes* atau *digest* digunakan sebagai checksum. Checksum biasanya direpresentasikan dengan menggunakan string hexadecimal (e.g., 69fac420b...), ukurannya berkisar antara 32 sampai 128 digit. Fungsi *hash cryptographic* ini memiliki tiga

properti utama, yakni pre-image resistance, second pre-image resistance, dan collision resistance [9]. Fungsi *hash cryptographic* yang sering digunakan adalah MD5, SHA-1, dan SHA-2. MD5 merupakan salah satu fungsi *hash cryptographic* pertama yang dicanangkan. Namun pada akhir 1990an, algoritma tersebut mulai ditinggalkan karena berhasil dirusak sehingga tidak baik untuk keamanan. SHA-1 direkomendasikan oleh National Institute of Standards and Technology (NIST) sampai pada tahun 2015, algoritmanya terbobol. Sekarang, SHA-2 menjadi algoritma terpopuler yang direkomendasikan NIST untuk melakukan verifikasi integritas file [10].

A. MD5

Sebuah *MD5 message-digest algorithm* adalah hash function yang *cryptographically broken* tapi masih sering digunakan untuk membuat nilai hash 128 bit. *Cryptographically broken* maksudnya adalah secara security sudah tidak aman atau *vulnerable*. Pada awalnya, MD5 didesain sebagai fungsi *hash cryptographic*, namun ditemukan banyak vulnerability pada MD5, yang membuat algoritma ini ditinggalkan. MD5 masih bisa digunakan untuk melakukan verifikasi integritas data, namun hanya untuk mengecek kerusakan data yang tidak disengaja. MD5 masih cocok digunakan untuk hal-hal non kriptografik, seperti menentukan partisi dari kunci tertentu pada database yang sudah dipartisi, dan juga beberapa orang masih memilih menggunakan MD5 daripada *Secure Hash Algorithm* (SHA) karena beban komputasi yang lebih ringan [11]. MD5 didesain oleh Ronald Rivest tahun 1991 untuk menggantikan MD4, dan dispesifikasikan pada tahun 1992 sebagai RFC 1321. Salah satu kebutuhan dasar dari fungsi *hash cryptographic* adalah harus secara komputasional tidak mungkin ditemukan dua buah data yang berbeda dan memiliki nilai hash yang sama. MD5 gagal melakukan hal tersebut dan berdampak cukup fatal. Pada tahun 2019, MD5 tetaplah secara luas digunakan, meskipun kelemahan yang dimiliki sudah banyak didokumentasikan oleh para ahli security [12]. Sebuah *collision attack* dengan menggunakan komputer 2.6 GHz Pentium 4 dapat menemukan collision pada MD5 dalam hitungan detik. MD5 menggunakan *Merkle–Damgård construction*, jadi jika dua prefix dengan hash yang sama dapat dibuat, maka suffix umum dapat ditambahkan pada keduanya untuk membuat collision yang terjadi dapat diterima dan dianggap valid pada aplikasi yang menggunakannya.

MD5 digest sudah digunakan secara luas pada dunia perangkat lunak untuk memberikan sebuah jaminan dimana file yang ditransmisikan telah tiba dan datanya sama dengan data yang asli. Sebagai contoh, file pada server-server umumnya menyediakan MD5sum yang sudah dikomputasi untuk file tertentu, sehingga user yang mengunduh file tersebut dapat membandingkan apakah file yang diterima sama dan utuh dengan file asli yang terdapat pada server. Kebanyakan UNIX-based system menggunakan MD5sum pada package manager-nya. ROM pada Android juga menggunakan checksum jenis MD5 ini. MD5 juga biasa digunakan untuk hashing password satu arah, namun NIST tidak merekomendasikan MD5 untuk keperluan ini



Gambar 2. File transmisi dengan hashing

MD5 akan memproses pesan yang memiliki panjang bervariasi menjadi output dengan panjang 128 bit. Pesan masukan dipecah menjadi block-block 512 bit, dan pada pesan dilakukan padding agar panjangnya dapat dibagi dengan 512. Cara paddingnya adalah: pertama, satu bit, 1 ditambah pada akhir pesan. Kemudian bit ini diikuti dengan nol sebanyak yang dibutuhkan untuk membuat panjang message kurang dari 64 bit dari kelipatan 512. Bit sisa yang panjangnya 64 bit diisi dengan 64 bit yang merepresentasikan panjang pesan mulanya, modulo 2.

Algoritma inti dari MD5 bekerja pada keadaan 128-bit, dibagi menjadi 32-bit words, dinotasikan dengan A, B, C, dan D. Variabel tersebut diinisialisasi ke konstanta tertentu. Algoritma inti akan menggunakan tiap blok pesan berukuran 512-bit untuk memodifikasi statenya. Pemrosessan dari blok pesan terdiri dari 4 tahap, termed rounds; tiap tahap terdiri dari 16 operasi yang mirip berdasarkan fungsi linear F, penjumlahan modular, dan rotasi ke kiri. Berikut persamaannya. Terdapat 4 fungsi yang mungkin terjadi, fungsi berbeda digunakan untuk tiap tahapan atau round.

$$F(B, C, D) = (B \wedge C) \vee (\neg B \vee D) \tag{1}$$

$$G(B, C, D) = (B \wedge D) \vee (B \vee \neg D) \tag{2}$$

$$H(B, C, D) = B \oplus C \oplus D \tag{3}$$

$$I(B, C, D) = C \oplus (B \vee \neg D) \tag{4}$$

```
import hashlib

file_name = 'filename.exe'

original_md5 = '6941402abc4b2a76b9719d911420c592'
```

```
with open(file_name) as file_to_check:
    data = file_to_check.read().encode()
    md5_returned = hashlib.md5(data).hexdigest()

if original_md5 == md5_returned:
    print('MD5 verified.')
else:
    print('MD5 verification failed!.')
```

Listing 3. Program python sederhana untuk cek md5sum

Pada Listing 3 adalah contoh program python sederhana untuk melakukan checksum menggunakan MD5. Program tersebut menggunakan library bawaan bernama hashlib.

B. SHA-1

SHA-1 merupakan fungsi *hash cryptographic* yang menerima input lalu akan mengeluarkan output 160-bit (20 byte) nilai hash yang dikenal sebagai *message digest*, yang biasanya adalah angka hexadesimal dengan panjang 40 digit. SHA-1 dibuat oleh NSA, badan keamanan Amerika. Sejak tahun 2005, SHA sudah tidak dianggap aman oleh badan-badan keamanan [13]. NIST secara formal tidak memperbolehkan penggunaan SHA pada tahun 2013. Penggantian SHA-1 terbilang urgent pada penggunaannya dalam digital signature seperti SSL certificate. Semua web browser populer tidak menerima sertifikat SSL SHA-1 pada tahun 2017 [14, 15]. SHA-1 memproduksi message digest dan prinsipnya mirip dengan MD5, namun membuat nilai hash yang lebih besar (160 bit vs 128 bit). Version control system seperti Git, Mercurial, dan Monotone menggunakan SHA-1 bukan untuk sekuriti, namun untuk pengecekan revisi dan untuk menjamin datanya tidak berubah karena korup yang tidak disengaja.

Untuk hash function yang mana L adalah jumlah bit di message digest, menemukan message yang sesuai dengan message digest dapat selalu dilakukan dengan metode *brute force* yang kira-kira dilakukan 2^L iterasi. Ini dinamakan preimage attack dan mungkin bekerja mungkin juga tidak tergantung dari L dan kekuatan komputasi dari komputer. Akan tetapi, sebuah *collision*, yang terdiri dari menemukan dua pesan berbeda yang menghasilkan message digest yang sama memerlukan kurang lebih $1.2 \times 2^{L/2}$ iterasi apabila menggunakan birthday attack. Beberapa aplikasi yang menggunakan cryptographic hashes, seperti penyimpanan password, tidak terlalu terdampak oleh collision attack. Membuat password yang bekerja untuk suatu akun membutuhkan preimage attack, dan juga akses ke hash pada password originalnya. Pada kasus tanda tangan dokumen, attacker tidak dapat langsung memalsukan signature dari dokumen yang sudah ada. Attacker harus membuat sepasang dokumen, satu yang tidak merusak, dan satu untuk merusak, dan membuat pemegang *private key* untuk menandatangani dokumen yang tidak merusak.

```
import hashlib

file_name = 'filename.exe'
original_sha1 = ('d1e67b8819b009ec6942033'
                 'b6fc1928dd64b5df31bcde63'
                 '81b9d3f90488d25324049046'
                 '0c0a5a1a873da8236c12ef969')

with open(file_name) as file_to_check:
    data = file_to_check.read().encode()
    sha1_returned = hashlib.sha1(data).hexdigest()

if original_sha1 == sha1_returned:
    print('SHA-1 verified.')
else:
    print('SHA-1 verification failed!.')
```

Listing 4. Program python sederhana untuk cek sha1sum

Pada Listing 4 adalah contoh program python sederhana untuk melakukan checksum menggunakan algoritma SHA-1. Program tersebut menggunakan library bawaan bernama hashlib.

C. SHA-2

SHA-2 merupakan perubahan yang cukup signifikan dibandingkan pendahulunya, SHA-1. SHA-2 family terdiri atas enam buah hash function dengan digests (nilai hash) yang bernilai 2254, 256, 384 atau 512 bit: SHA-224, SHA-256, SHA-384, SHA-512, SHA-512/224, SHA-512/256. Hash function pada SHA-2 digunakan secara luas pada sejumlah aplikasi dan protokol sekuriti seperti TLS dan SSL, PGP, SSH, S/MIME dan IPsec. SHA-256 digunakan dalam proses autentikasi package software di OS Debian. SHA-256 dan SHA-512 direncanakan untuk digunakan pada DNSSEC [16].

D. SHA-3

SHA-3 merupakan member terbaru dari family Secure Hash Algorithm (SHA), yang dirilis oleh NIST pada tahun 2015. Meskipun masih satu family, SHA-3 secara internal berbeda dengan SHA-1 dan SHA-2 yang strukturnya seperti MD5. SHA-3 merupakan subset dari *Keccak* [17].

Keccak didasari dari pendekatan baru yang dinamakan sponge construction. Sponge construction didasari dari fungsi random atau fungsi permutasi, dan menerima (atau "menyerap", dalam istilah sponge) input data sebanyak apapun, kemudian mengoutput ("memeras") berapapun jumlah datanya, sambil bertindak sebagai *pseudorandom function*. Pada state absorbing, blok pesan di-XOR menjadi subset dari state, yang kemudian ditransformasikan secara keseluruhan menggunakan fungsi permutasi f. Pada state "squeeze", blok-blok output dibaca dari subset yang sama dari state, berselang-seling dengan fungsi transformasi state f. Ukuran dari bagian pada state yang tertulis dan dibaca dinamakan "rate" (dinotasikan sebagai r), dan ukuran dari bagian yang tidak tersentuh oleh input/output dinamakan capacity (dinotasikan sebagai c). Kapasitas ini menentukan tingkat dari sekuritinya. Level maksimum dari sekuritinya adalah separuh dari kapasitasnya. Akgoritma dari *Keccak* adalah sebagai berikut [18].

Fungsi theta terdiri dari tiga persamaan yang melibatkan operasi XOR sederhana dan bitwise cyclic shift.

$$C[X] = XOR(A[X,0], A[X,1], A[X,2], A[X,3], A[X,4]) \quad (5)$$

Circular shift ke kiri pertama diaktifkan di lima jalur output. Setelah tahap ini, jalur terakhir menjadi yang pertama dan jalur kedua terakhir akan menjadi jalur terakhir. Kemudian circular shift ke kanan dilakukan pada lajur tersebut sehingga jalur pertama menjadi jalur terakhir dan jalur kedua menjadi jalur pertama. Sekarang circular shift ke kiri diterapkan pada setiap jalur untuk mengubah posisi dari bit pada tiap lajur [18, 19].

$$D[X] = ROT(C[X-1], C[X+1, 1]) \quad (6)$$

Input state matrix dan output jalur yang didapat dari (5)(6) di-XOR kan.

$$A[X,Y] = XOR(A[X,Y], D[X]), 0 \leq X; Y \leq 4 \quad (7)$$

Rho (ρ) dan Pi (Π) dapat diekspresikan untuk menghitung array B berukuran 5×5 dari state array A. Operasi dari rho dan Pi, melakukan rotasi sirkular sebanyak nilai tetap yang bergantun pada koordinat X dan Y.

$$r[X,Y], B[Y, 2X+3Y] = ROT(A[X,Y], r[X,Y]) \quad (8)$$

Jalur yang dirotasikan ditempatkan di array B. Ini disebut sebagai Pi step. Indeks yang diambil adalah modulo 5.

Jalurnya dioperasikan dengan fungsi chi (χ) seperti berikut.

$$A[X,Y] = B[X,Y]((\neg B[X+1,Y]) \wedge B[X+2,Y]) \quad (9)$$

Step Iota (10) adalah step paling sederhana dari algoritma Keccak. Step ini hanya melakukan operasi XOR pada konstanta bit RC dengan jalur pada lokasi $[0,0]$ dari matrix state baru A.

$$A[0,0] = XOR(A[0,0], RC) \quad (10)$$

```
import hashlib

file_name = 'filename.exe'

original_sha3 = ('3706a96a8fa96b3fc5ff30c'
                 'bca36ce666042e2d07762022'
                 'a78a2ec82439848fc3695e83'
                 '336ab71f47dddbc24b96454df2a43'
                 '7e343801a4e13faab89e8d0fda61')

with open(file_name) as file_to_check:
    data = file_to_check.read().encode()
    sha3_returned = hashlib.sha3_512(data).hexdigest()

if original_sha3 == sha3_returned:
    print('SHA-3 verified.')
else:
    print('SHA-3 verification failed!.')
```

Listing 5. Program python sederhana untuk cek sha3sum 512 bit

E. Lorem Ipsum

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetuer eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetuer tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

1) Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor.
2) Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede.
3) Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus, augue.

V. Cyclic Redundancy Check

Sebuah *Cyclic Redundancy Check* adalah *error-detecting code* yang biasa digunakan pada jaringan digital dan storage untuk mendeteksi adanya perubahan yang tidak diinginkan pada data. Blok data yang memasuki sistem CRC akan diberikan *check value*, berdasarkan sisa dari pembagian polinomial dari kontennya. Saat pengambilan data, kalkulasi tersebut diulang lagi dan apabila check value tidak sesuai maka dapat dilakukan koreksi untuk menghindari data yang korup. CRC dapat digunakan untuk *error-correction* [20]. Varian CRC-1 dikenal juga sebagai parity bit (III).

Sejatinya, CRC merupakan tipe dari checksum, dan memiliki konsep yang mirip dengan checksum. Akan tetapi, terdapat perbedaan diantaranya sehingga saya memutuskan untuk memberikannya bab tersendiri. CRC merupakan checksum yang secara spesifik adalah *position dependent checksum algorithm*. Dari namanya tersebut, CRC dapat mendeteksi perpindahan posisi, yang membuatnya menjadi integrity check yang umum digunakan. CRC juga populer dikarenakan kesederhanaannya dibandingkan algoritma checksum yang lainnya seperti MD5 dan SHA family. CRC juga lebih mudah untuk dianalisis secara matematis dan baik untuk mendeteksi error yang umum terjadi dikarenakan oleh noise pada transmission channel. CRC sendiri tidak didesain dengan tujuan kriptografik, karena CRC dapat direverse sehingga untuk alasan keamanan lebih dianjurkan untuk menggunakan SHA-2.

A. Integritas Data

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, CRC didesain secara spesifik untuk keperluan error-checking, dimana CRC akan mendeteksi kesalahan dengan beban komputasi yang jauh lebih ringan dibandingkan dengan Cryptographic Hash Function. Maka dari itu, CRC tidak cocok untuk melindungi dari modifikasi data yang disengaja. Yang pertama, karena tidak ada autentikasi, *attacker* dapat memodifikasi pesan dan menghitung ulang CRCnya tanpa terdeteksi. Ketika disimpan bersama dengan data, baik CRC maupun Cryptographic Hash Function tidak melindungi dari perubahan data yang disengaja. Aplikasi yang memerlukan proteksi dari serangan tersebut harus menggunakan mekanisme autentikasi kriptografik, seperti *message authentication codes* (MAC) atau *digital signatures*. Yang kedua, tidak seperti MD5 maupun SHA, CRC dapat dengan mudah direverse, yang membuat CRC tidak cocok untuk digunakan sebagai *digital signatures* [21]. Yang ketiga, CRC memiliki hubungan yang mirip dengan fungsi linear [22].

$$CRC(x \oplus y) = CRC(x) \oplus CRC(y) \oplus c \qquad (11)$$

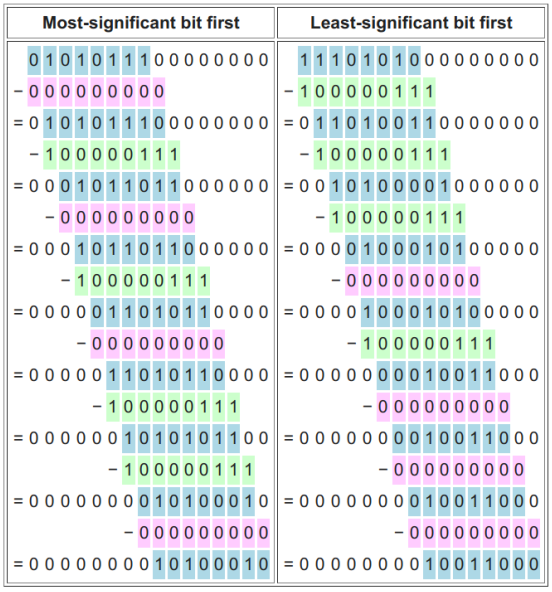
Dimana c bergantung dari panjang x dan y. Persamaan 11 juga bisa dituliskan seperti berikut, dimana x, y, dan z memiliki panjang yang sama.

$$CRC(x \oplus y \oplus z) = CRC(x) \oplus CRC(y) \oplus CRC(z) \qquad (12)$$

Maka, bahkan ketika CRC dienkripsi dengan *stream cipher* yang menggunakan XOR sebagai operasi kombinasinya, baik pesan maupun CRC dapat dimanipulasi tanpa sepengetahuan dari *encryption key*, ini merupakan salah satu *design flaws* dari protokol Wired Equivalent Privacy (WEP) [23].

B. Algoritma

Komputasi dari CRC diturunkan dari polynomial division, modulo dua. Ini menyerupai pembagian dari pesan string biner, dengan nol bit yang jumlahnya tetap diappend oleh string "generator polynomial", tetapi dengan menggunakan XOR, bukan pengurangan. Pembagian jenis ini sudah direalisasikan di harware dengan shift register yang sudah dimodifikasi [24]. Contoh dari implementasi polynomial division pada hardware, misalnya kita mencoba untuk menghitung CRC 8-bit dari pesan 8-bit yang terdiri dari karakter ASCII "W", yang binernya adalah 01010111_2, desimal 87_10 atau hexadecimal 57_16. Sebagai ilustrasi, kita menggunakan CRC-8-ATM (HEC) polinomial $x^6 + x^2 + x + 1$. Menuliskan bit pertama yang ditransmisikan (koefisien dari pangkat tertinggi x) di sebelah kiri, sesuai dengan string 9-bit "100000111". Nilai byte 57_16 dapat dikirimkan dalam dua urutan berbeda, bergantung dari konvensi urutan bit yang digunakan. Tiap urutan menghasilkan pesan polinomial $M(x)$ yang berbeda. Msbit-first, $x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$ = 01010111, bila lsbit-first, $x^7 + x^6 + x^5 + 3 + 1$ = 11101010. Nilai ini dapat dikalikan dengan x^8 untuk menghasilkan dua pesan 16-bit polinomial $x^8M(x)$. Menghitung sisanya terdiri dari mengurangi kelipatan dari generator polinomial $G(x)$. Ini hanya seperti pembagian desimal, tapi lebih sederhana karena kelipatan yang mungkin hanyalah 0 dan 1, dan pengurangannya meminjam dari "tak terhingga", bukan mengurangi dari digit yang lebih tinggi. Karena kita tidak peduli dengan hasil bagi, maka tidak perlu dituliskan.



Gambar 3. Perhitungan polynomial division

Perhatikan bahwa untuk setiap pengurangan, bit-bitnya dibagi menjadi 3 bagian, grup yang berisi nol, grup yang tidak

diubah dari originalnya, dan grup yang berwarna biru, yang "menarik". Grup yang menarik ini panjangnya 8-bit, menyamai pangkat dari polinomial. Setiap langkah, kelipatan yang benar dikurangi untuk membuat grup nol menjadi satu bit lebih besar, dan grup yang tidak berubah menjadi satu bit lebih pendek, hingga akhirnya meninggalkan satu sisa.

```
def crc_remainder(input_bitstring,
                  polynomial_bitstring,
                  initial_filler):
    """Calculate the CRC remainder of a string of
    bits using a chosen polynomial.
    initial_filler should be '1' or '0'.
    """
    polynomial_bitstring = polynomial_bitstring.lstrip('0')
    len_input = len(input_bitstring)
    initial_padding = (len(polynomial_bitstring) - 1) \
         * initial_filler
    input_padded_array = list(input_bitstring \
        + initial_padding)
    while '1' in input_padded_array[:len_input]:
        cur_shift = input_padded_array.index('1')
        for i in range(len(polynomial_bitstring)):
            input_padded_array[cur_shift + i] \
            = str(\
                int(polynomial_bitstring\
                    [i] != input_padded_array\
            [cur_shift + i]))
    return ''.join(input_padded_array)[len_input:]

def crc_check(input_bitstring,
              polynomial_bitstring,
              check_value):
    """Calculate the CRC check of a string of bits using a
    chosen polynomial."""
    polynomial_bitstring = polynomial_bitstring.lstrip('0')
    len_input = len(input_bitstring)
    initial_padding = check_value
    input_padded_array = \
        list(input_bitstring + initial_padding)
    while '1' in input_padded_array[:len_input]:
        cur_shift = input_padded_array.index('1')
        for i in range(len(polynomial_bitstring)):
            input_padded_array[cur_shift + i] \
            = str(int(polynomial_bitstring\
                [i] != input_padded_array\
            [cur_shift + i]))
    return ('1' not in ''.join(input_padded_array)[len_input:])
```

Listing 6. Program CRC.

Program dari listing 6 berisi fungsi yang akan mereturn nilai sisa awal dari CRC untuk input dan polinomial yang ditentukan, entah dengan 1 atau 0 sebagai padding awalnya.

```
>>> crc_remainder('11010011101100', '1011', '0')
'100'
>>> crc_check('11010011101100', '1011', '100')
True
```

Listing 7. Output dari listing 6.

```
#include <inttypes.h> // uint32_t, uint8_t

uint32_t CRC32(const uint8_t data[], size_t data_length) {
        uint32_t crc32 = 0xFFFFFFFFu;

        for (size_t i = 0; i < data_length; i++) {
                const uint32_t lookupIndex =
                (crc32 ^ data[i]) & 0xff;
                crc32 =
                (crc32 >> 8) ^ CRCTable[lookupIndex];
// CRCTable is an array of 256 32-bit constants
        }

// Finalize the CRC-32 value
// by inverting all the bits
        crc32 ^= 0xFFFFFFFFu;
        return crc32;
}
```

Listing 8. Program CRC dalam bahasa C.

Listing 8 merupakan algoritma CRC-32 [25] dalam bahasa C. Variable CRCTable adalah memoization dari kalkulasi yang harus diulang untuk setiap byte dari pesan.

VI. Kesimpulan

Etiam pede massa, dapibus vitae, rhoncus in, placerat posuere, odio. Vestibulum luctus commodo lacus. Morbi lacus dui, tempor sed, euismod eget, condimentum at, tortor. Phasellus aliquet odio ac lacus tempor faucibus. Praesent sed sem. Praesent iaculis. Cras rhoncus tellus sed justo ullamcorper sagittis. Donec quis orci. Sed ut tortor quis tellus euismod tincidunt. Suspendisse congue nisl eu elit. Aliquam tortor diam, tempus id, tristique eget, sodales vel, nulla. Praesent tellus mi, condimentum sed, viverra at, consectetuer quis, lectus. In auctor vehicula orci. Sed pede sapien, euismod in, suscipit in, pharetra placerat, metus. Vivamus commodo dui non odio. Donec et felis.

Etiam suscipit aliquam arcu. Aliquam sit amet est ac purus bibendum congue. Sed in eros. Morbi non orci. Pellentesque mattis lacinia elit. Fusce molestie velit in ligula. Nullam et orci vitae nibh vulputate auctor. Aliquam eget purus. Nulla auctor wisi sed ipsum. Morbi porttitor tellus ac enim. Fusce ornare. Proin ipsum enim, tincidunt in, ornare venenatis, molestie a, augue. Donec vel pede in lacus sagittis porta. Sed hendrerit ipsum quis nisl. Suspendisse quis massa ac nibh pretium cursus. Sed sodales. Nam eu neque quis pede dignissim ornare. Maecenas eu purus ac urna tincidunt congue.

Donec et nisl id sapien blandit mattis. Aenean dictum odio sit amet risus. Morbi purus. Nulla a est sit amet purus venenatis iaculis. Vivamus viverra purus vel magna. Donec in justo sed odio malesuada dapibus. Nunc ultrices aliquam nunc. Vivamus facilisis pellentesque velit. Nulla nunc velit, vulputate dapibus, vulputate id, mattis ac, justo. Nam mattis elit dapibus purus.

Quisque enim risus, congue non, elementum ut, mattis quis, sem. Quisque elit.

PUSTAKA

[1] W. Stalling, *Operating Systems: Internals and Design Principles, Seventh Edition*. New York: Prentice Hall, 2012.

[2] "Everything is a file descriptor or a process," 2015. [Online]. Available: https://yarchive.net/comp/linux/everything_is_file.html

[3] V. Prabhakaran, N. Agrawal, L. N. Bairavasundaram, H. S. Gunawi, A. C. Arpaci-Dusseau, and R. H. Arpaci-Dusseau, "Iron file systems," in *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP '05)*, 2005.

[4] W. H. RodgerE, Ziemer; Tranter, *Principles of communication : systems, modulation, and noise*. New Jersey: Hoboken, 2015.

[5] H.-C. Hsiao, Y.-H. Lin, A. Studer, C. Studer, K.-H. Wang, H. Kikuchi, A. Perrig, H.-M. Sun, and B.-Y. Yang, "A study of user-friendly hash comparison schemes," in *2009 Annual Computer Security Applications Conference*, 2009, pp. 105–114.

[6] N. Unger, S. Dechand, J. Bonneau, S. Fahl, H. Perl, I. Goldberg, and M. Smith, "Sok: Secure messaging," in *2015 IEEE Symposium on Security and Privacy*, 2015, pp. 232–249.

[7] E. Vaziripour, J. Wu, M. O'Neill, R. Clinton, J. Whitehead, S. Heidbrink, K. Seamons, and D. Zappala, "Is that you, alice? a usability study of the authentication ceremony of secure messaging applications," in *2017 ACM Symposium on Usable Privacy and Security (SOUPS)*, 2017.

[8] J. Cappos, J. Samuel, S. Baker, and J. H. Hartman, "A look in the mirror: Attacks on package managers," in *Proceedings of the 15th ACM Conference on Computer and Communications Security*, ser. CCS '08. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2008, p. 565–574. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/1455770.1455841

[9] B. Preneel, "Cryptographic hash functions," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 1994.

[10] "Nist policy on hash functions," 2015. [Online]. Available: https://csrc.nist.gov/projects/hash-functions/nist-policy-on-hash-functions

[11] M. Kleppmann, *Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems*, 1st ed. O'Reilly Media, 2017.

[12] "A quarter of major cmss use outdated md5 as the default password hashing scheme," 2019. [Online]. Available: https://www.zdnet.com/article/a-quarter-of-major-cmss-use-outdated-md5-as-the-default-password-hashing-scheme/

[13] "Schneier on security: Cryptanalysis of sha-1," 2005. [Online]. Available: https://www.schneier.com/blog/archives/2005/02/cryptanalysis_o.html

[14] "The end of sha-1 on the public web," 2019. [Online]. Available: https://blog.mozilla.org/security/2017/02/23/the-end-of-sha-1-on-the-public-web/

[15] "Google will drop sha-1 encryption from chrome by january 1, 2017," 2015. [Online]. Available: https://venturebeat.com/2015/12/18/google-will-drop-sha-1-encryption-from-chrome-by-january-1-2017/

[16] "Use of sha-2 algorithms with rsa in dnskey and rrsig resource records for dnssec," 2009. [Online]. Available: https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5702.txt

[17] "Nist selects winner of secure hash algorithm (sha-3) competition," 2012. [Online]. Available: https://www.nist.gov/itl/csd/sha-100212.cfm

[18] A. Arshad, D.-e.-S. Kundi, and A. Aziz, "Compact implementation of sha3-512 on fpga," in *2014 Conference on Information Assurance and Cyber Security (CIACS)*, 2014.

[19] N. Chandran and E. Manuel, "Performance analysis of modified sha-3," *Procedia Technology*, vol. 24, pp. 904–910, 12 2016.

[20] "An algorithm for error correcting cyclic redundance checks7," 2003. [Online]. Available: https://www.drdobbs.com/an-algorithm-for-error-correcting-cyclic/184401662

[21] M. Stigge, H. Plotz, W. Muller, and J.-P. Redlich, "Reversing crc(theory and practice)," in *HU Berlin Public Report SAR-PR-2006-05*, 2006. [Online]. Available: http://sar.informatik.hu-berlin.de/research/publications/SAR-PR-2006-05/SAR-PR-2006-05_.pdf

[22] "algorithm design - why is crc said to be linear?" 2003. [Online]. Available: https://crypto.stackexchange.com/a/34013

[23] N. Cam-Winget, R. Housley, D. Wagner, and J. Walker, "Security flaws in 802.11 data link protocols," *Commun. ACM*, vol. 46, no. 5, p. 35–39, May 2003. [Online]. Available: https://doi.org/10.1145/769800.769823

[24] E. Dubrova and S. S. Mansouri, "A bdd-based approach to constructing lfsrs for parallel crc encoding," in *2012 IEEE 42nd International Symposium on Multiple-Valued Logic*, 2012, pp. 128–133.

[25] "[ms-abs]: 32-bit crc algorithm | microsoft docs," 2019. [Online]. Available: https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd905031.aspx