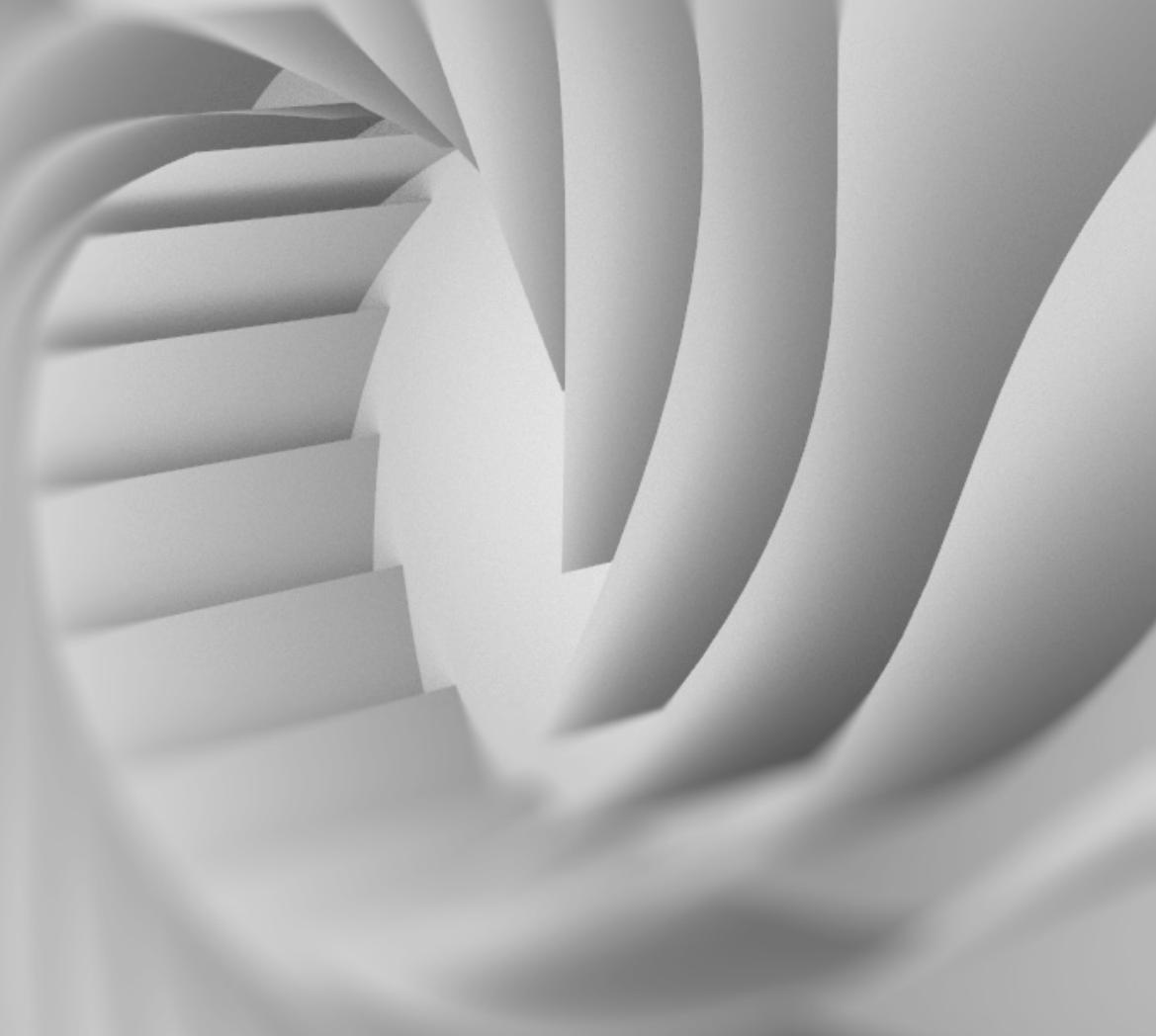


FABRIKASI

prinsip kerja perangkat
properti material
metode assembly
metode printing



10. FABRIKASI DIGITAL

File latihan di bab ini dapat diunduh di:
<https://github.com/aswinindra/eskacangmerah>

Secara ringkas istilah Fabrikasi Digital (*Digital Fabrication*) adalah jenis proses manufaktur dimana mesin-mesin yang digunakan untuk memproduksi keluaran desain, **dikendalikan oleh komputer**. Hubungan antara desain dan fabrikasi produk desain selalu menjadi aspek penting dalam arsitektur dan desain produk industri. Khusus dalam bidang arsitektur, adanya penemuan dan inovasi dalam material, teknik manufaktur serta metode perakitan (*assembly*) akan mengubah paradigma merancang dan membangun.

Sebelum revolusi digital, arsitek melakukan analisis, memproduksi hasil desain dalam bentuk gambar-gambar dan model berskala (maket), membuat gambar yang lebih detil atas suatu elemen atau komponen yang mana informasi ini akan diteruskan ke kontraktor, *vendor, fabricator* yang akan melakukan interpretasi dari informasi dalam gambar atau maket untuk selanjutnya diproduksi atau dibangun. Teknologi manufaktur dan teknologi membangun akan menentukan hasil desain yang dapat direalisasikan.

Dalam perkembangan revolusi digital, terutama dengan adanya perangkat baik software maupun hardware yang dapat menjadi alat bantu desain tidak hanya dalam ranah geometri orthogonal, melainkan juga geometri non-ortogonal, proses analisis dan pembuatan purwarupa (*prototype*) desain tidak lagi memerlukan pihak di luar arsitek. Informasi desain dalam bentuk digital diinterpretasikan oleh peralatan dan mesin-mesin manufaktur yang dikendalikan oleh software.

Lahirlah apa yang dinamakan **fabrikasi digital** (*Digital Fabrication*).¹²

Dengan teknologi ini, arsitek memiliki perangkat tambahan dalam mengelaborasi, menganalisis dan memproduksi hasil desain dengan tingkat fleksibilitas dan akurasi yang lebih tinggi untuk membuat desain dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi.

Perangkat-perangkat fabrikasi digital umumnya dinamakan **CNC** (*Computer Numerically Controlled*) yakni perangkat-perangkat dimana komputer digunakan untuk mengendalikan dan mengontrol pergerakan mesin.

Semua perangkat CNC memerlukan file digital sebagai perintah untuk memotong, menggrafir, atau menambah material (kasus 3D Printer). Proses mendesain obyek 3D (untuk 3D Printer) atau melakukan konversi dari obyek 3D ke komponen-komponen yang nanti akan dirakit (kasus CNC milling router dan laser cutter) dapat dilakukan di hampir semua software CAD atau 3D modeling, misalnya AutocAD, SketchUp, Rhinoceros 3D. Proses-proses ini bisa merupakan proses konvensional, artinya menggunakan metode

¹² Buku bagus dan praktis untuk yang mendalami fabrikasi khususnya CNC adalah: Filson, Anne, Gary Rohrbacher & Anna Kaziunas France (2017). *Design for CNC*. Maker Media Inc.

pemodelan CAD atau 3D, atau bisa juga, bagian dari proses ini menggunakan metode parametrik.

Intinya adalah, kita tidak harus menggunakan metode parametrik untuk dapat memanfaatkan perangkat-perangkat CNC.

10.1. Pemodelan Untuk Fabrikasi Dengan Laser Cutter



Gambar 209. Mesin Laser Cutter

Laser Cutter adalah jenis mesin CNC yang menggunakan sinar laser untuk **memotong** (*vector cut*) atau **meng-grafir** (*raster cut*) material berbentuk lembaran pada bidang potongnya. Material yang dapat digunakan antara lain berbasis kayu, cardboard, MDF, material berbasis kertas bahkan metal. Karena menggunakan sinar laser yang memotong material berdasarkan panas maka bahan potong untuk laser Cutter tidak disarankan yang mengeluarkan limbah asap beracun atau mudah terbakar.

Laser cutter bekerja dengan memancarkan sinar laser dengan titik fokus, kekuatan dan kecepatan tertentu dari bagian *head* mesin ke bidang yang akan dipotong. Perangkat *head* ini umumnya terletak pada elemen mesin yang bisa bergerak pada bidang XY yang menentukan ukuran kapasitas maksimal bidang potong dari mesin laser cutter tersebut. Untuk dapat memotong, titik fokal dari sinar laser harus jatuh pada permukaan bidang potong. Sebagai prosedur standar, sebelum melakukan pemotongan, ada dua hal yang disiapkan:

1. **Kalibrasi koordinat XY** titik acuan di bidang potong dan titik acuan di file yang mana terdapat obyek yang akan dipotong.
2. **Kalibrasi titik fokus** mesin laser cutter.

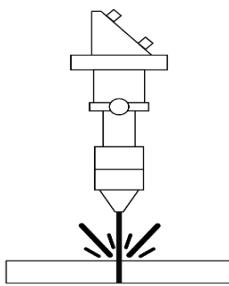
Kualitas dan kapasitas mesin laser cutter ditentukan oleh beberapa hal diantaranya: kekuatan (*electric power*), material untuk memproduksi sinar laser. Mesin laser berbasis gas umumnya menggunakan gas CO₂ untuk memproduksi sinar laser dan material yang bisa dipotong diantaranya: berbasis kertas dan berbasis kayu, berbasis kulit, beberapa jenis plastik dan busa sintetis (*styrofoam*). Beberapa mesin laser berbahan CO₂ dapat digunakan untuk meng-grafir permukaan logam.

Mesin Laser Cutter termasuk dalam teknik **Substraktif** dimana obyek final dibuat dengan jalan menghilangkan atau mengurangi bahan atau material asal. Mesin laser cutter manghasilkan bentuk potong untuk dirangkai secara manual. Karena hanya dapat memotong material berupa lembaran atau bidang, maka proses fabrikasi dan perakitan (*assembly*) untuk obyek 3D memerlukan prosedur tertentu agar proses manual perakitan elemen-elemen setelah pemotongan dapat dilakukan dengan tepat.

10.1.1. Prinsip Pemodelan

Prinsip pemodelan obyek yang akan dipotong dengan mesin laser Cutter dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Jika obyek berupa 3D, maka semua elemen atau komponen harus dipetakan (*unwrap*) pada bidang 2D (XY) dengan menuliskan label pada setiap komponen. Terdapat beberapa teknik dan *add-ins* Grasshopper untuk membantu memecah dan memetakan obyek 3D menjadi kumpulan obyek 2D.
2. Garis-garis potong (*vector cut*) harus dipisahkan dengan garis/obyek grafir (*raster cut*) dan menggunakan sistem layer yang ada di software CAD atau Vector Editing Software (Adobe Illustrator, CorelDraw).
3. Obyek potong harus dimodelkan di software pemodelan dimana obyek potong disusun. Obyek bidang potong ini ukurannya harus sesuai dengan ukuran bidang potong sebenarnya.
4. Nilai *kerf* dari mesin laser cutter harus diperhatikan khususnya jika membuat model yang akan dirangkai dengan tingkat presisi yang tinggi. Nilai Kerf adalah dimensi tebal yang dihasilkan ketika sinar laser mengenai suatu permukaan. Nilai ini bergantung dari berbagai faktor: jenis sinar laser, jenis material dan tebalnya, dan lain-lain. Namun umumnya nilai ini berkisar dari 0.15mm–0.2mm.



Gambar 210. Nilai Kerf. (Sumber: lasercutco.com)

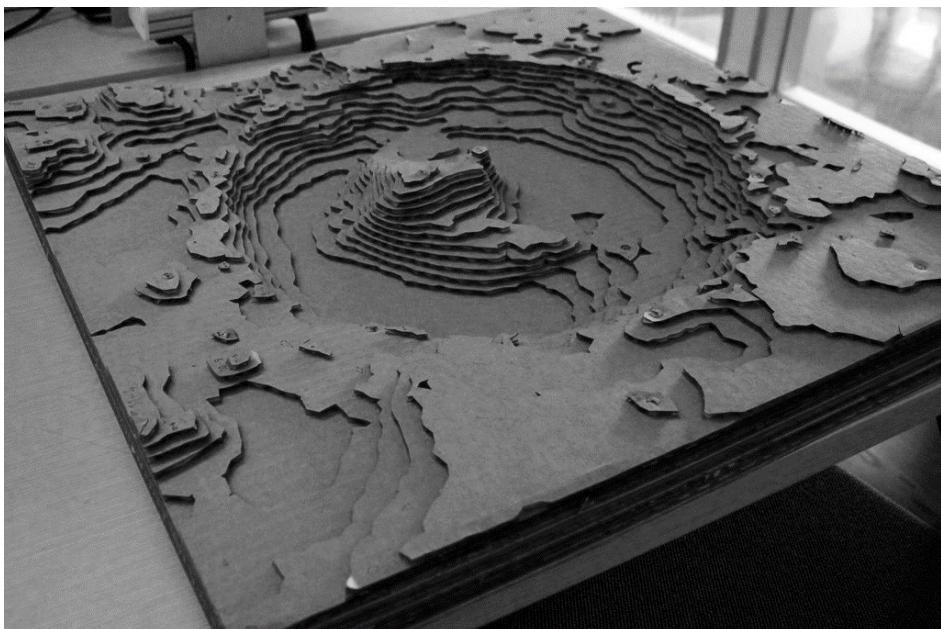
10.1.2. Alur Kerja

- Proses desain dilakukan di software CAD (AutoCAD, Rhinoceros, SketchUp, ArchiCAD, Revit, dan lainnya)
- Obyek di-eksport sebagai.DXF untuk dibaca di software Laser Cutter.

10.1.3. Jenis Perakitan (Assembly Types)

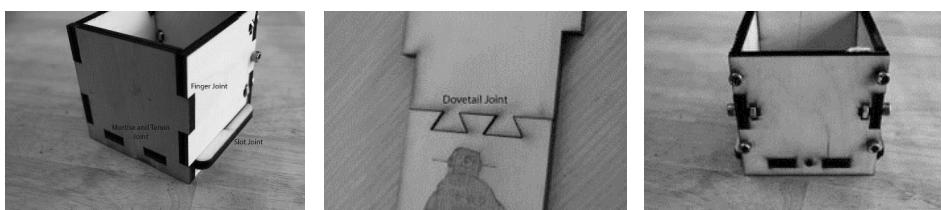
Beberapa jenis perakitan (assembly) yang bisa dilakukan dari hasil potong adalah:

1. **Stacking:** membuat obyek 3D dengan cara menumpuk bidang-bidang hasil potong. Teknik yang digunakan untuk ini adalah *contouring*.



Gambar 211. Hasil Laser Cutter. (Sumber: instructables.com)

2. **Sambungan (Joints):** ada beberapa jenis sambungan untuk membuat obyek 3D dari elemen-elemen bidang 2D hasil potong:
 - Finger Joint: digunakan untuk membuat sambungan pada sudut siku.
 - Tenon Joint: digunakan untuk membuat sambungan “T”
 - Slot Joint: digunakan untuk membuat sambungan “X”
 - Dovetail & Jigsaw Joint: digunakan untuk membuat sambungan parallel dari dua bidang.
 - Mur dan Baut
 - Beberapa jenis sambungan lain yang dapat dilihat di sini: <https://cdn.instructables.com/ORIG/FW1/4AF2/I2VLGSNJ/FW14AF2I2VLGSNJ.pdf>



Gambar 212. Hasil Laser Cutter untuk Sambungan. (Sumber: Instructables.com)

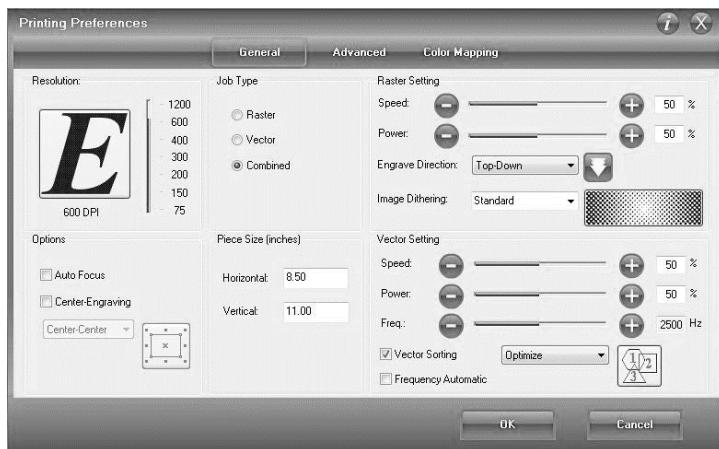
3. Engsel Fleksibel: menggunakan *kerf* untuk membuat bidang rigid menjadi fleksibel



Gambar 213. Hasil Laser Cutter Fleksibel. (Sumber: troteclaser.com)

10.1.4. Setting Mesin Laser Cutter

Beberapa mesin laser cutter memiliki software tersendiri yang berisi *setting* dan fitur untuk membaca file digital dengan berbagai format. Secara umum, setting yang ada di mesin laser cutter sebagai berikut:



Gambar 214. Setting Laser Cutter. (Sumber: instructables.com)

- Power:** menentukan berapa besar kekuatan laser. Semakin padat dan tebal material, semakin besar power yang diperlukan. Untuk raster cutting, semakin besar power akan mengakibatkan hasil grafir berwarna gelap.
- Speed:** menentukan kecepatan pergerakan *head* pada bidang XY. Pada raster cutting, *head* akan bergerak lebih cepat disbanding vector cutting.
- Frequency (vector cut):** menentukan kec[tan pulsa laser untuk proses pemotongan. Semakin tinggi nilai ini, semakin bersih hasil potong.
- Resolution (raster cut)** menentukan kualitas dan resolusi obyek grafir.

10.1.5. Fabrikasi dengan Laser Cutter

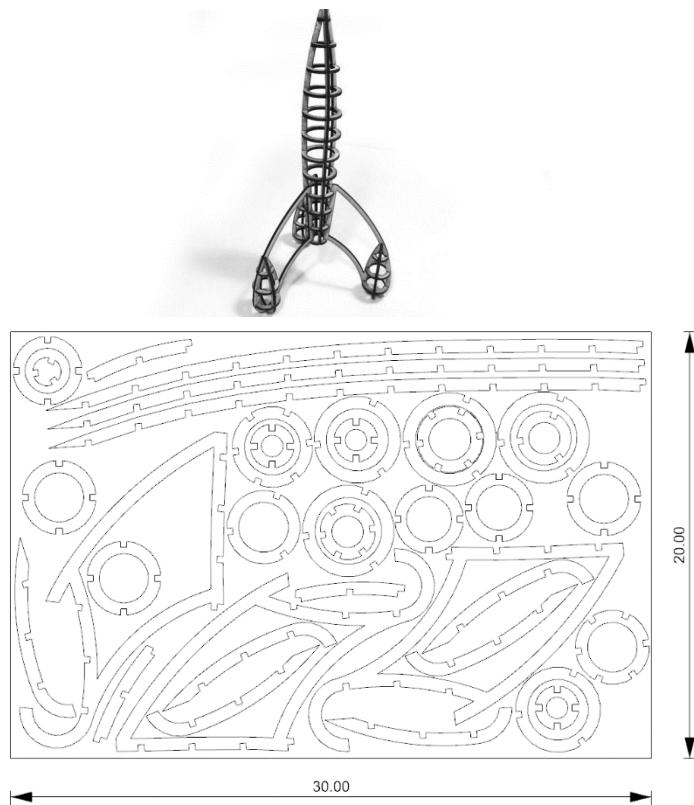
Fabrikasi dengan mesin laser cutter dilakukan pada bahan potong berupa bidang yang tidak terlalu tebal. Sebagaimana dijelaskan di muka, sesuai namanya, mesin laser cutter

dilakukan untuk memotong atau menggraffir obyek bidang, sehingga ada dua tahapan dasar yang harus diperhatikan ketika kita akan menggunakan mesin laser cutter:

- Jenis perakitan.** Apakah hasil potong akan ditumpuk (tidak memerlukan sambungan) atau disambung (memerlukan sambungan). Masing-masing jenis perakitan memerlukan penamaan/*labeling* yang umumnya digrafir pada bidang potong. Pelabelan ini gunanya untuk mempermudah proses perakitan karena kita tahu obyek yang akan disambung.
- Material potong.** Mengetahui ketebalan dan juga dimensi material potong penting agar kita dapat merencanakan konfigurasi elemen-elemen potong secara efektif. Dimensi material potong kita tentukan di awal dan di dalam software CAD/Rhinoceros, sehingga ketika obyek siap dipotong, kita bisa letakkan dalam *rectangle* yang merupakan obyek material potong.

1. Potong dan Rakit

Beberapa sumber di internet¹³ menyediakan petunjuk dan juga contoh file untuk memotong dan merakit obyek menggunakan mesin laser cutter. Di sini kita bisa berlatih untuk menyusun obyek gambar di Rhinoceros dan melakukan set-up untuk mesin laser cutter.

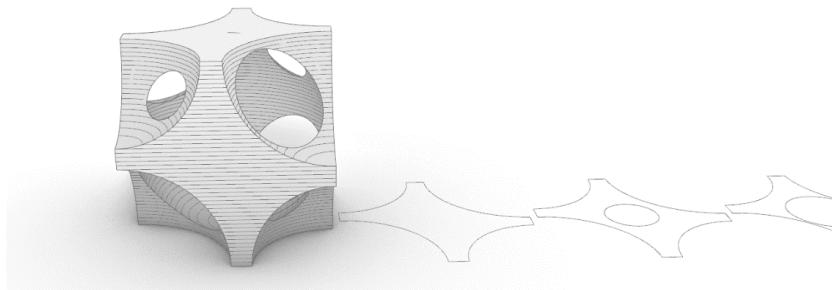


Gambar 215. Space Rocket oleh jtronics (Sumber: <http://www.thingiverse.com/thing:24568>)

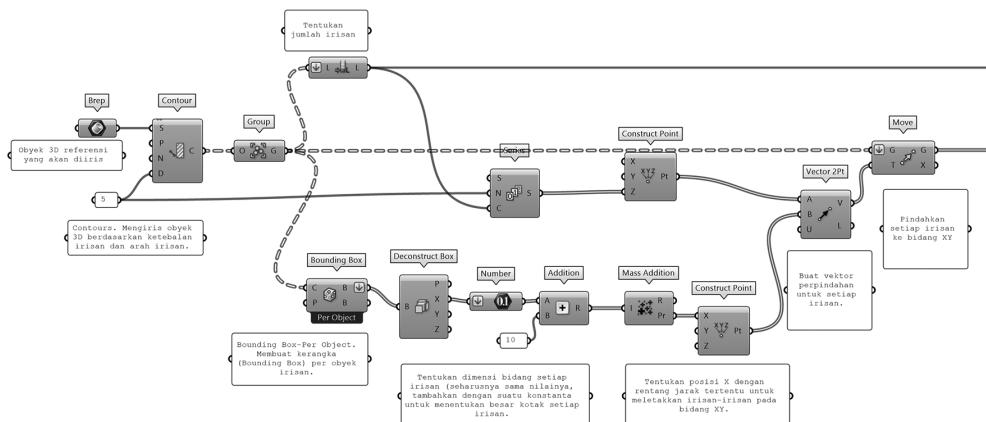
13 thingiverse.com dan beberapa situs sejenis menyediakan sumber-sumber belajar yang sangat baik untuk fabrikasi digital.

- Buka file gambar (.DXF) di Rhinoceros dan cek ukuran bidang potong.
- Tentukan layer untuk potong.

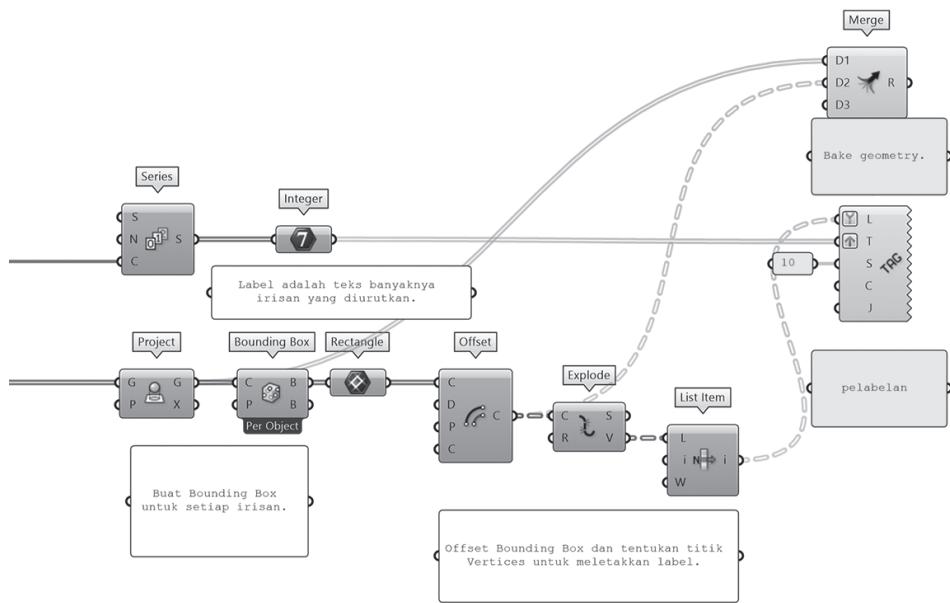
2. Contouring dasar 1



Gambar 216. Contouring dasar



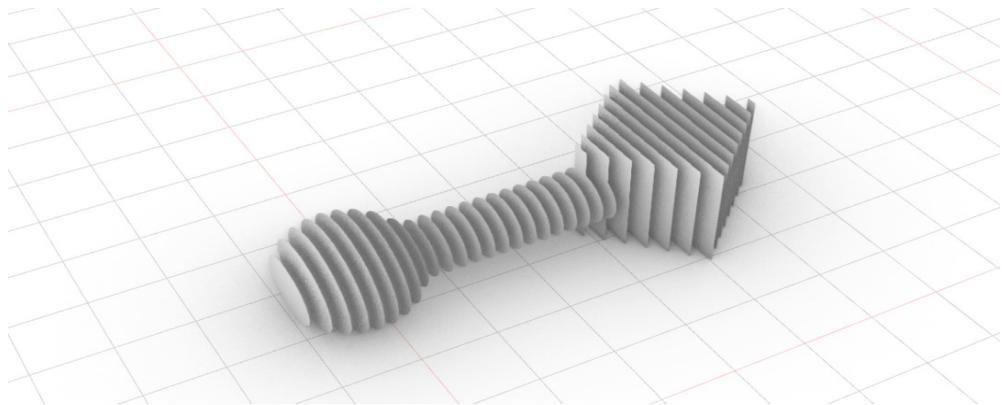
- Ambil geometri 3D yang akan diiris (*contouring*).
- Gunakan komponen **Contours** dengan parameter $D=distance$; disesuaikan dengan tebal bidang/ material potong.
- *Bagaimana memindahkan bidang-bidang irisan ke bidang XY?*
- Dengan **Bounding Box-Per object**, gunakan **Deconstruct Box** untuk menentukan dimensi pada sumbu X setiap irisan.
- Tambahkan sebuah nilai (konstanta) untuk setiap nilai dimensi X, gunakan **Mass Addition** untuk menambahkan setiap nilai secara akumulatif. Hasil nilai ini akan menjadi koordinat X untuk meletakkan setiap irisan.
- Gunakan **Series** untuk menentukan nilai Z setiap irisan, menggunakan parameter N dari nilai D dari komponen **Contour**.
- Menentukan vektor pemindahan setiap irisan menggunakan komponen **Vector2Pt**. Titik pertama adalah nilai Z dari setiap irisan, titik kedua adalah titik-titik dengan nilai X dari proses keluaran **Mass Addition**.
- Move setiap irisan (flatten) sesuai hasil **Vector2Pt**.



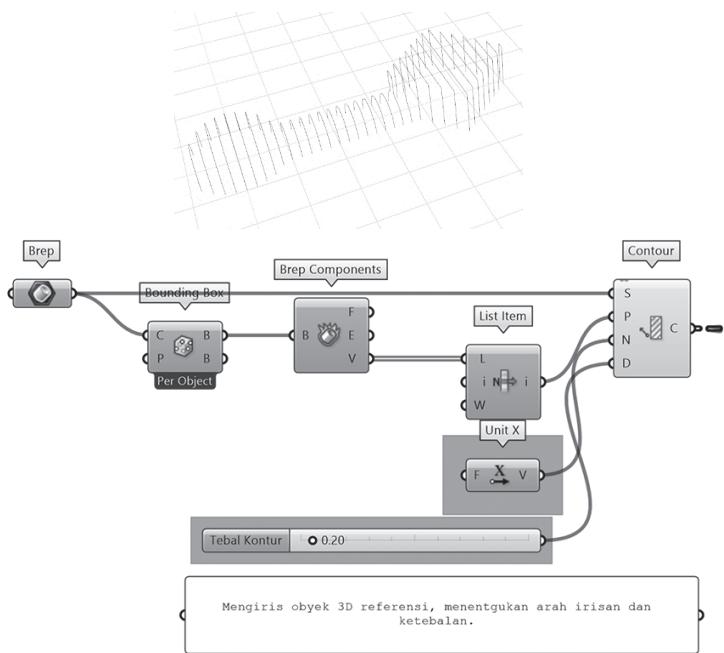
- Proyeksikan obyek pada bidang XY dengan komponen Project.
- Buat Bounding Box untuk setiap irisan pada bidang XY dengan Bounding Box-Per Object.
- Offset Box dengan komponen Offset dan tentukan titik vertices untuk meletakkan label.
- Gunakan Texttag3D untuk membuat teks dari urutan jumlah irisan dan posisinya sesuai dengan titik-titik vertices.
- Bake geometri beserta teks, lalu susun obyek di Rhinoceros.

Kita kemudian dapat menentukan geometri di Rhinoceros dengan Layer tertentu bila ingin memotong atau meng-grafir.

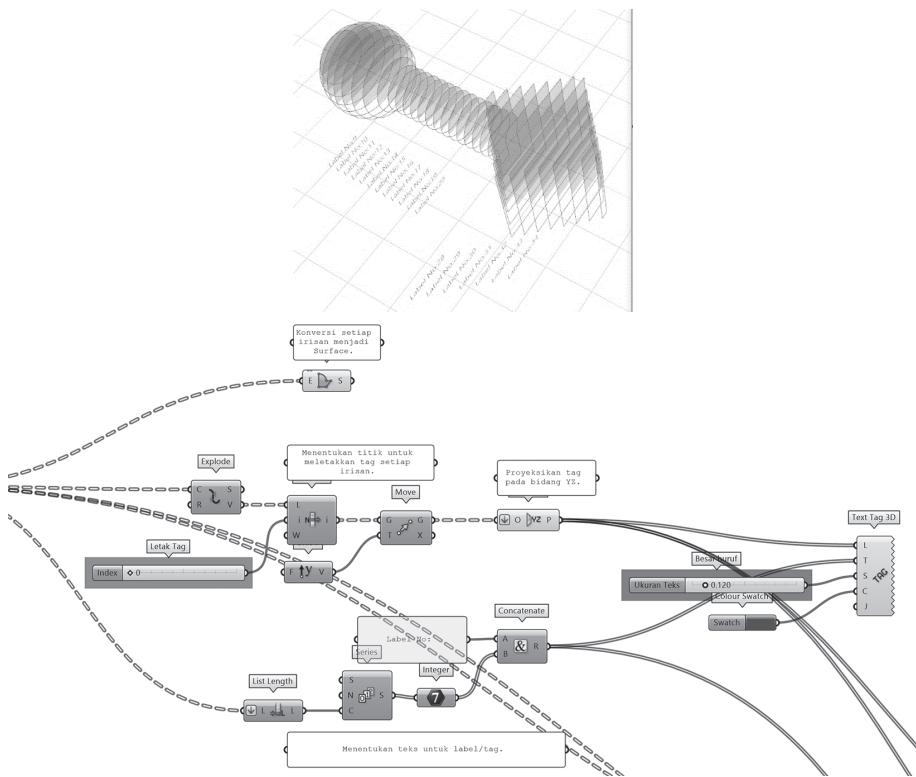
3. Contouring Dasar 2



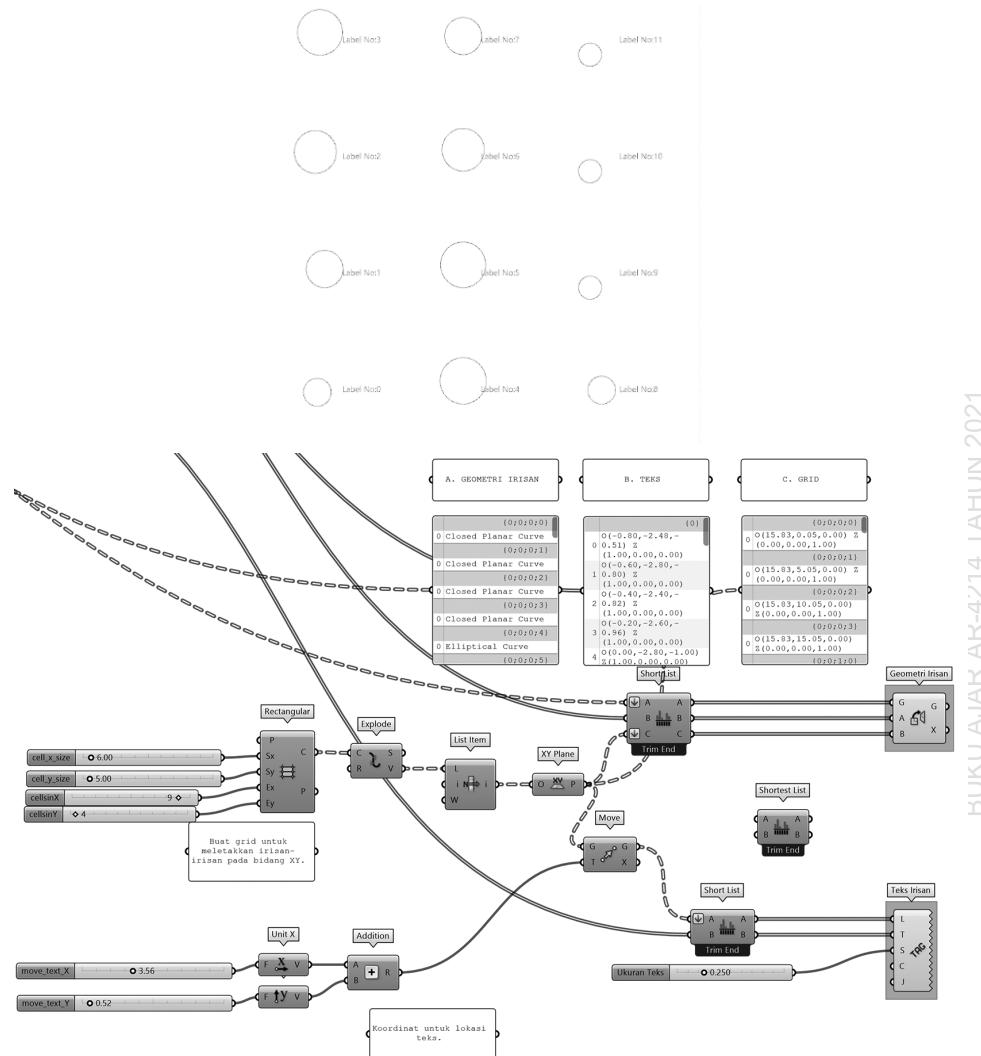
Gambar 217. Contouring Dasar 2



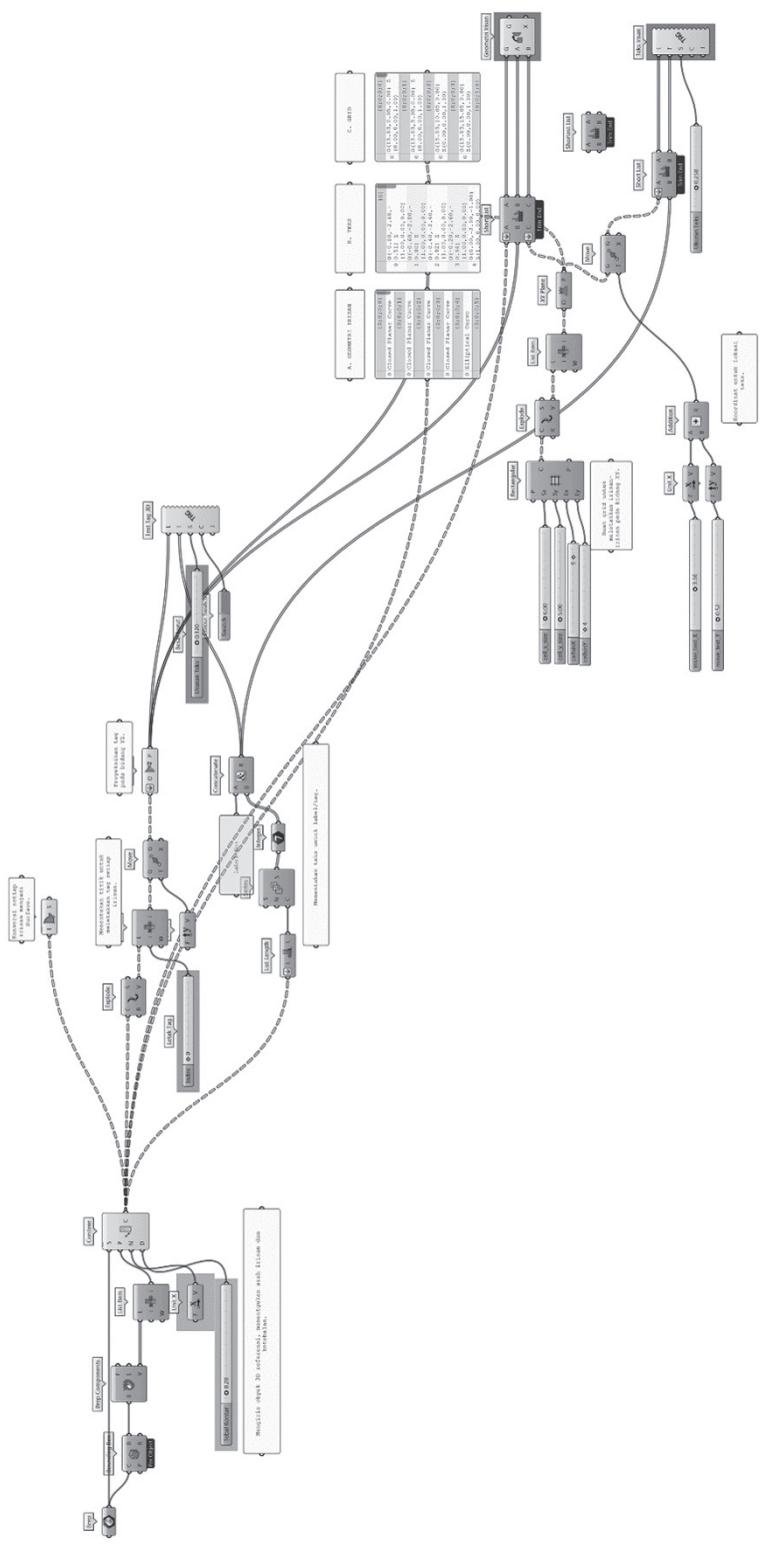
- Gunakan Bounding Box- Per Object untuk membuat kerangka per irisian, lalu dengan Deconstruct Brep, ekstraksi setiap vertices dengan index 0 untuk menentukan Start Point dari komponen Contour.



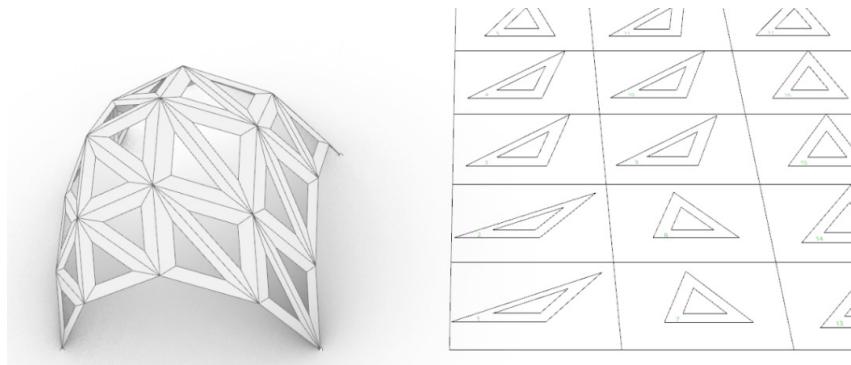
- Konversi setiap irisan menjadi Surface dengan PlanarSurface.
- Tentukan titik untuk meletakkan label/tag sesuai dengan bidang iris. Tentukan Label dan urutannya.
- Sekarang kita punya geometri irisan dan teks label/tag untuk setiap irisan. *Bagaimana kita memetakan pada bidang XY?*



- Dengan komponen **Shortest List**, petakan geometri irisan, teks irisan dan grid dan masukkan pada komponen **Orient**. Di sini masing-masing keluaran akan dipetakan pada bidang XY: geometri irisan (G- Geometry), teks irisan (A- Source Plane), dan grid (B- Target).
- Dengan komponen **Shortest List**, pindahkan teks agar posisinya relatif dekat dengan geometri irisan.

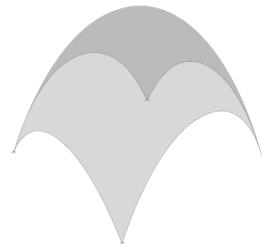


4. Perakitan Dari Obyek 3D (Assembly)

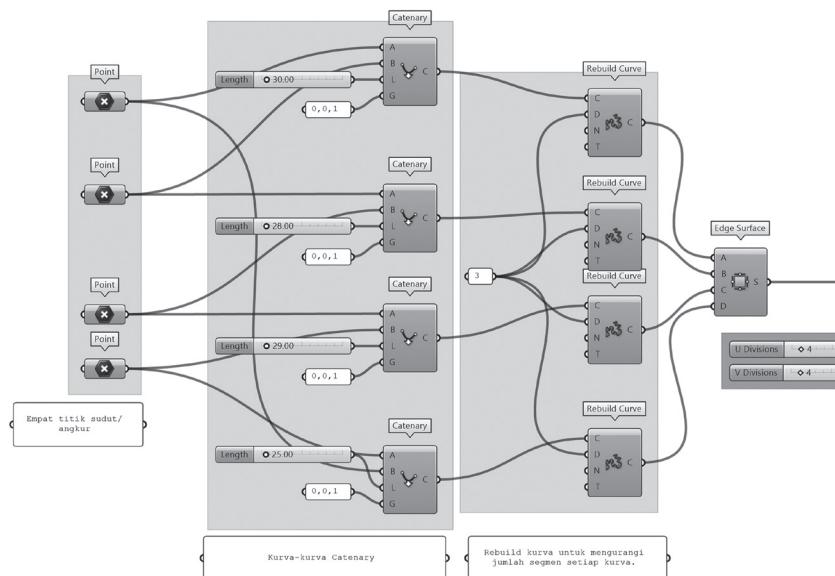


Gambar 218. Assembly

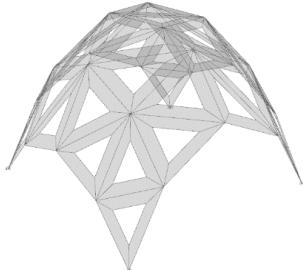
Perakitan (*assembly*) obyek 3D dalam bentuk panel-panel memerlukan proses memetakan panel-panel itu pada bidang-bidang sesuai dengan dimensi bidang atau material potong, memberi label (tag) pada masing-masing panel dan juga label pada obyek 3D sebagai panduan ketika kita akan menyusun ulang panel-panel menjadi obyek 3D.



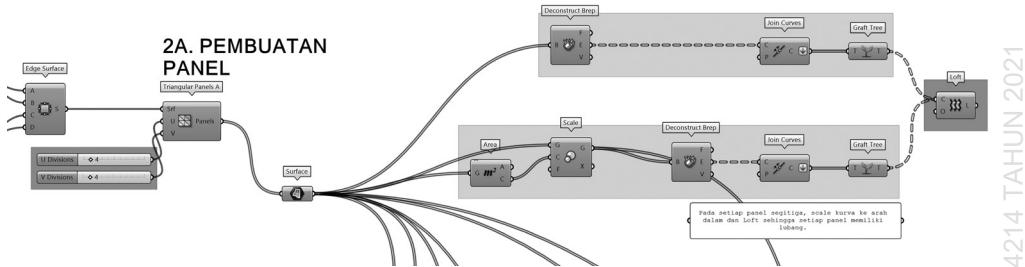
1. PERSIAPAN GEOMETRI



- Buat empat **Point** di Rhino, lalu menggunakan komponen **Catenary**, buat empat kurva yang menghubungkan antar titik.
- **Rebuild Curve** hasil kurva agar mengurangi jumlah segmen (mempercepat proses pembuatan Surface)
- Dengan **Edge Surface**, buat surface dari empat kurva tersebut.

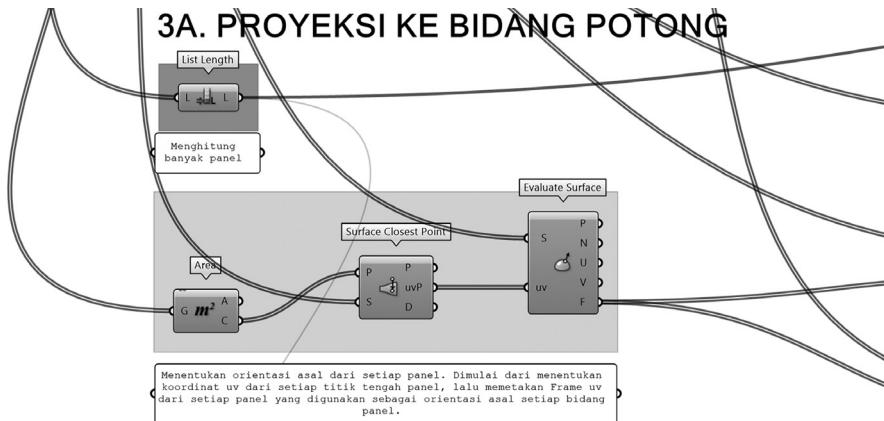


2B. DESAIN PANEL



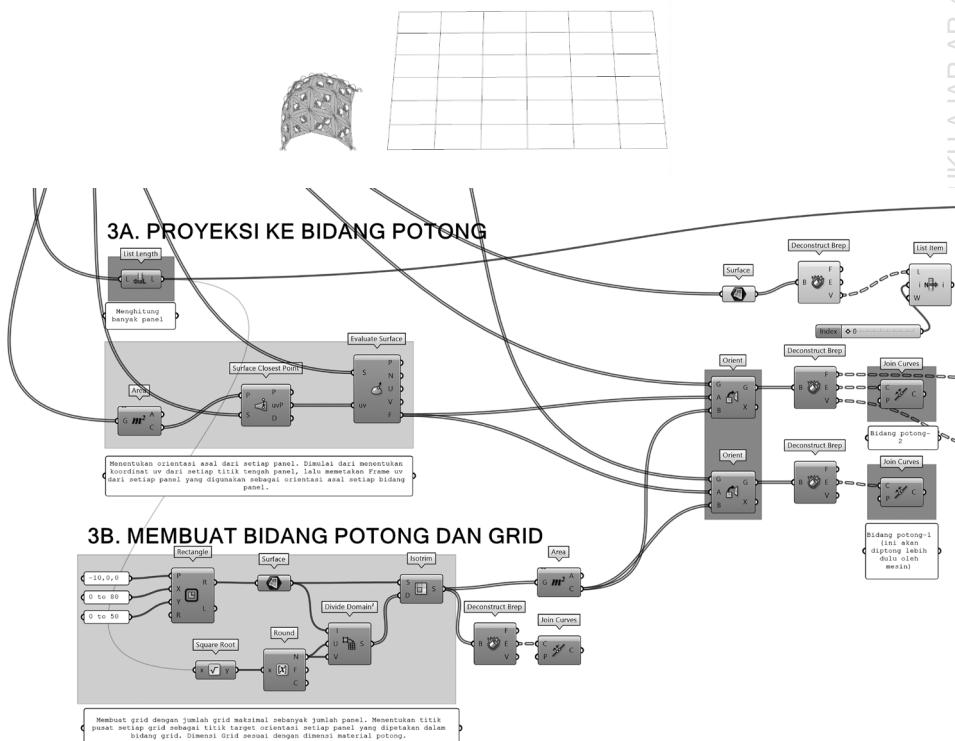
- Dengan **Lunch Box-Triangular Panel A**, buat panel-panel segitiga dengan parameter U dan V.
- Sekarang kita akan membuat segitiga yang lebih kecil dari masing-masing panel segitiga. Prinsipnya adalah, Edge pada segitiga awal akan di-loft dengan Edge pada segitiga yang lebih kecil sehingga menghasilkan permukaan seperti pada gambar.
- Tentukan pusat setiap panel segitiga dengan **Area**, lalu dengan **Scale**, skalakan obyek surface (panel).
- **Deconstruct Brep** untuk mengekstrak Edge dari masing-masing surface, lalu **Join Curve**.
- Buat **Graft** untuk masing-masing kelompok Curve, lalu **Loft**.
- Hasil ini adalah obyek yang akan kita potong panel-panelnya. Perhatikan bahwa setiap panel ada lubang-lubang segitiga.



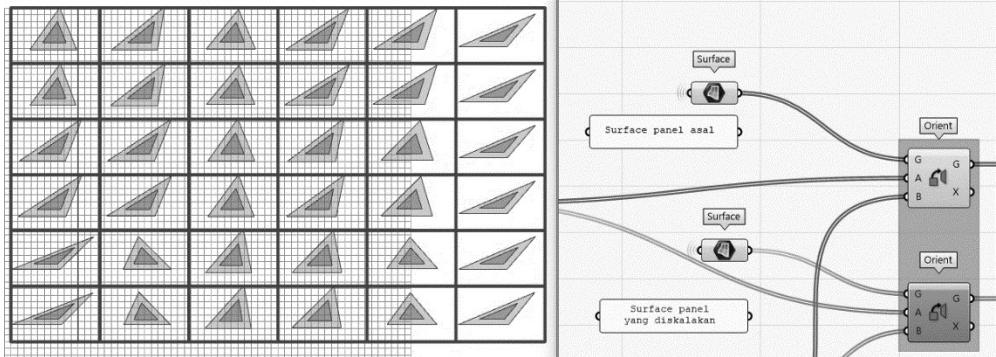


- Langkah selanjutnya adalah memetakan panel-panel segitiga pada bidang XY dimana kita akan petakan panel-panel ini pada grid dengan dimensi sesuai ukuran material potong.
- Proses memproyeksikan obyek 3D ke bidang 2D menggunakan komponen Orient. Sebelum itu pastikan kita memiliki informasi Plane (Frame) dari setiap panel. Perhatikan bahwa plane setiap panel ini arbitrari/ tidak ada yang sama.
- Gunakan Area untuk menentukan pusat setiap panel. Gunakan Surface Closest Point untuk menentukan koordinat lokal (uvP) dari setiap titik pusat panel.
- Komponen Evaluate Surface digunakan untuk menentukan Plane (Frame) setiap panel. Informasi Frame ini yang akan kita gunakan pada komponen Orient.

LUKU AJAR AR-4214 AHM 20

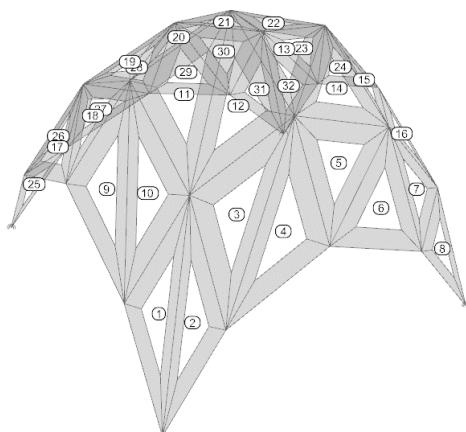


- Kita merencanakan grid dengan jumlah total grid yang mengakomodasi jumlah panel. Jumlah panel didapatkan dengan komponen **ListLength** pada Surface (panel-panel segitiga).
- **Rectangle** digunakan untuk membuat kotak yang dimensinya adalah dimensi maksimal bidang potong. Pada contoh di atas ukuran bidang potong adalah 60cm x 50cm. Bidang ini akan kita bagi menjadi grid. Konversi **Rectangle** menjadi **Surface**, lalu dengan **Divide Domain²** dan **Isotrim**, buat grid. Kita dapat menentukan banyaknya grid pada arah u dan v menggunakan akar (**Square**) dari nilai jumlah panel (**List Length**).
- Konversi Grid menjadi kurva dan **Join Curve**. Garis-garis grid ini nantinya akan dipotong.
- Gunakan dua komponen Orient untuk memetakan: 1) Segitiga luar dan 2) segitiga dalam.

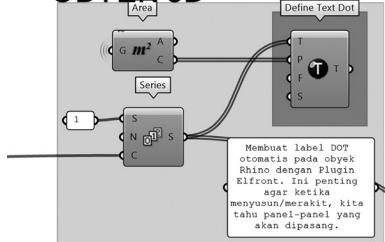


- Orient pertama: memetakan panel-panel segitiga asal: G= Geometri yang diorientasikan; A=plane(Frame) obyek asal; T= plane target. Plane target didapatkan dari titik pusat setiap grid. Orient kedua: memetakan panel-panel segitiga yang diskalakan.

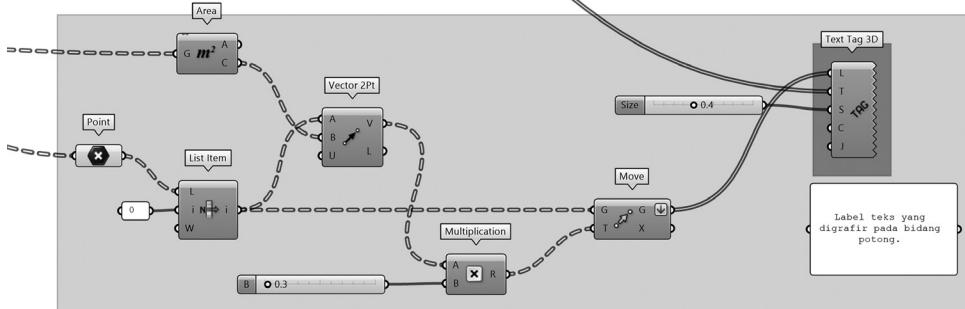
BUKU AJAR AR-4214 TAHUN 2021



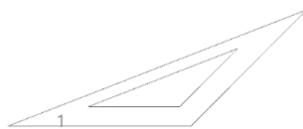
4. LABEL PADA OBYEK 3D

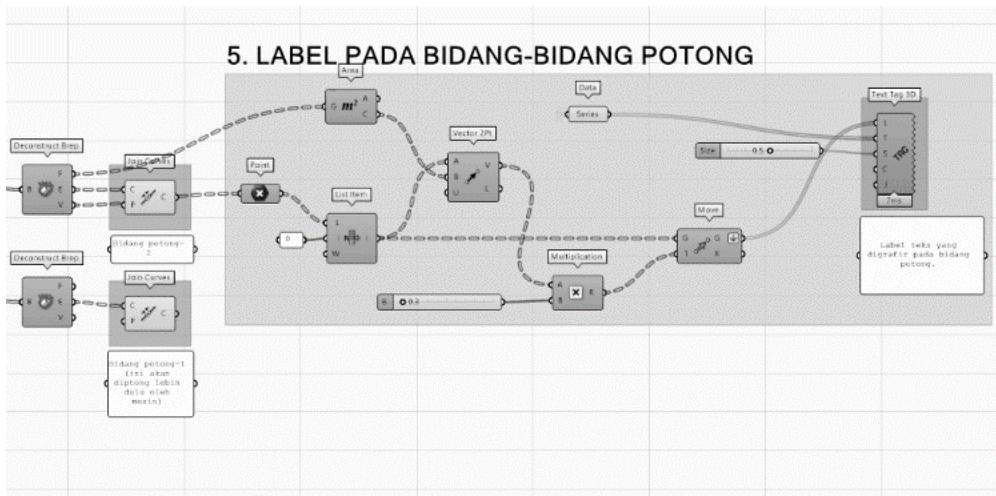


5. LABEL PADA BIDANG-BIDANG ROTONG

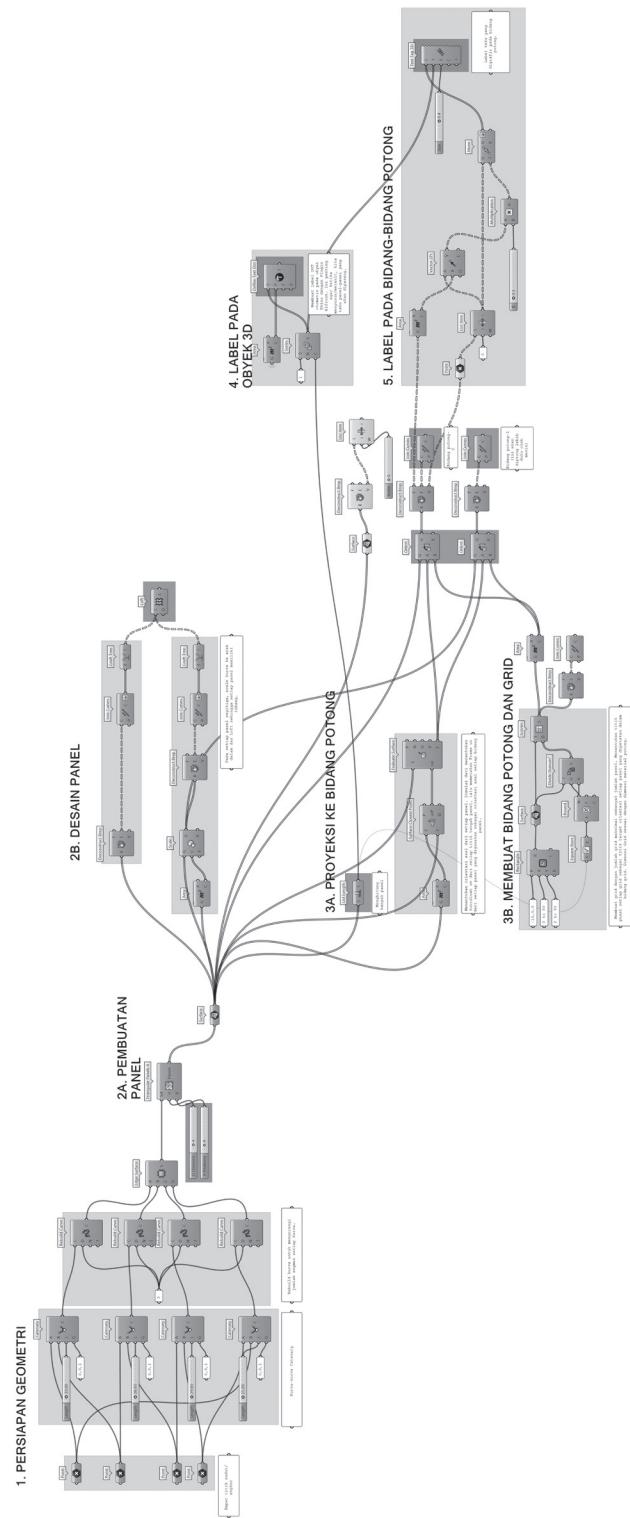


- Memberi label/tag pada obyek 3D sebagai panduan perakitan dilakukan menggunakan komponen **plugin Elefront** yakni: **Define Text Dot**. Dot sendiri adalah fitur di Rhinoceros untuk membuat teks yang independen terhadap kamera dan Zoom, jadi teks pada Dot akan selalu menghadap ke kamera dengan ukuran yang relatif sama. Menggunakan komponen Define Text Dot, kita akan secara otomatis membuat teks yang merupakan urutan List dari Surface yang berisi panel-panel segitiga tersebut.
- Komponen **Define Text Dot** memerlukan posisi/letak dan teks yang akan ditampilkan. Teks yang akan ditampilkan diproduksi oleh **Series** dimana parameter C= nilai maksimal List Length dari Surface.
- Sekarang kita bisa tahu letak panel dengan teks 1,2,3, dan seterusnya.



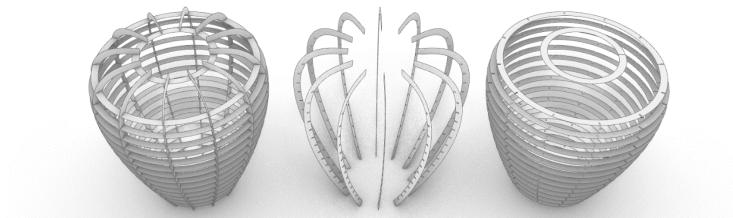


- Proses terakhir adalah membuat label sesuai dengan posisi label pada obyek 3D, pada masing-masing grid panel. Label ini nantinya akan di-grafir untuk menjadi panduan dalam proses perakitan panel-panel menjadi obyek 3D.
- Pada prinsipnya kita harus menentukan dimana meletakkan teks hasil dari **Series**, pada setiap panel. Ingat bahwa obyek segitiga dalam akan terpotong sehingga menyisakan panel segitiga dengan lubang di tengah. Karena itu obyek label harus berada pada bidang antara segitiga dalam dan segitiga luar.
- Gunakan **List Item** untuk mengekstrak salah satu Vertices. Dengan informasi titik pusat setiap panel, kita dapat membuat vector dengan komponen **Vector2Pt**.
- Hasil **Vector2Pt** ini sebenarnya adalah nilai yang kita gunakan untuk memindahkan point (misalnya salah satu titik sudut) sebagai titik posisi label.
- Kita bisa gunakan parameter untuk posisi titik label ini.
- Gunakan **Text Tag 3D** untuk membuat label.
- Proses selanjutnya di Rhino menentukan layer-layer untuk menentukan mana obyek yang dipotong, dan mana obyek yang akan di-grafir.



5. Slit Joints

Slit Joints adalah sistem sambungan antara komponen-komponen pembentuk struktur sebuah obyek tanpa tambahan komponen lain pada sambungan. Pada contoh obyek di atas, Slit Joints digunakan sebagai teknik untuk mengkonstruksi obyek yang terlebih dulu dikonversi menjadi bilah-bilah konstruksi vertikal dan horizontal. Masing-masing bilah memiliki area-area sambungan yang saling mengunci (slit).

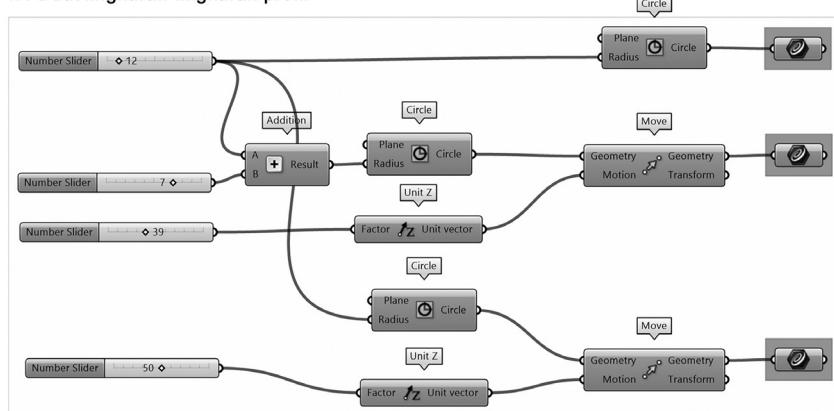


Gambar 219. Slit Joint

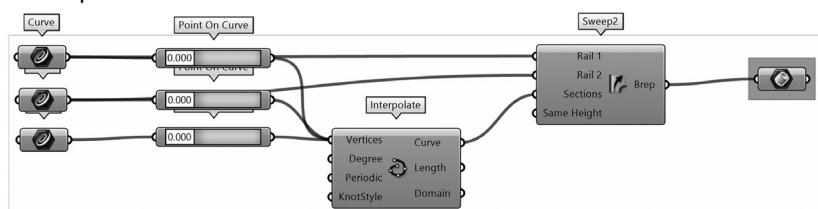


1. BUAT OBYEK

1.1 Buat lingkaran-lingkaran profil



1.2 Buat profil Arc

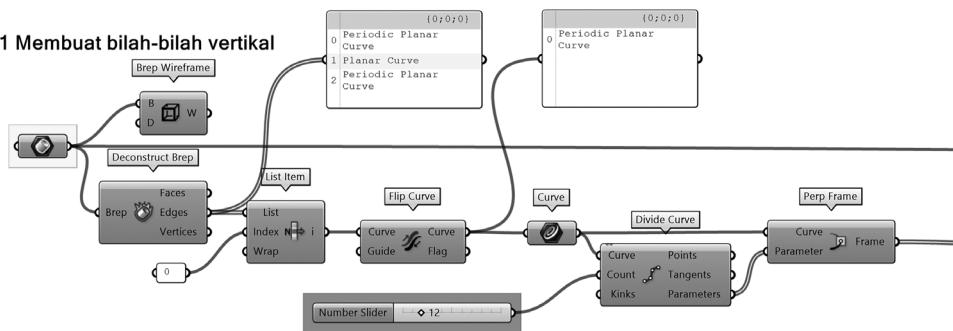


- Buat obyek 3D yang akan diekstraksi menjadi bilah-bilah (*ribs*) vertikal dan horizontal. Obyek 3D berupa *closed surface*.

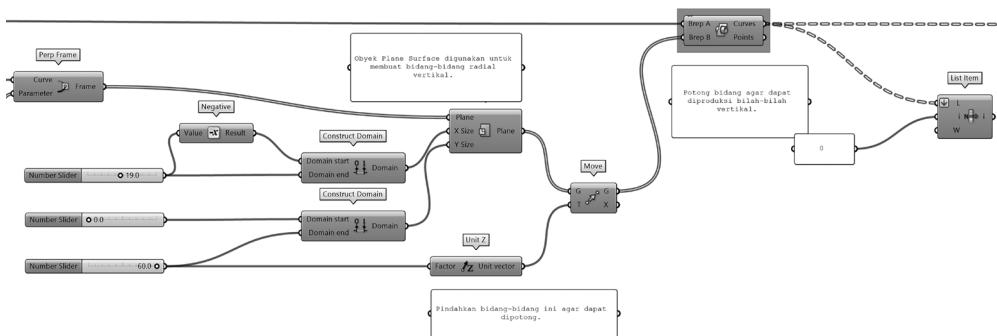
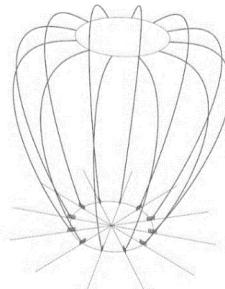


2. MEMBUAT BILAH VERTIKAL DAN BILAH HORIZONTAL

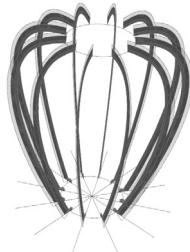
2.1 Membuat bilah-bilah vertikal



- Ekstrak salah satu Edges dari obyek Surface, bagi menjadi beberapa segmen dengan Divide Curve.
- Gunakan Perpendicular Frame untuk membuat Plane tegak lurus dengan titik-titik segmen.

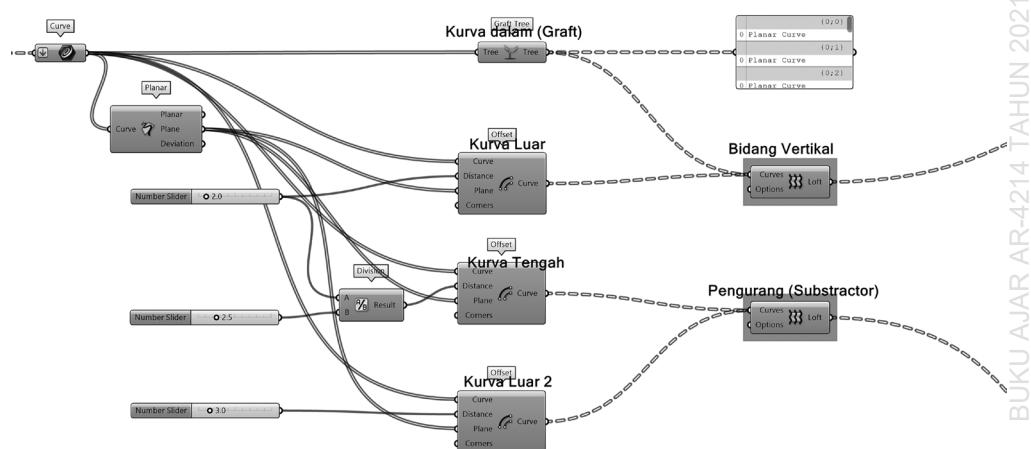


- Buat bidang-bidang Surface dengan **Planar Surface**, menggunakan Plane dari **Perpendicular Frame** dengan dimensi X dan Y sedemikian rupa sehingga memotong obyek 3D.
- Pindahkan bidang-bidang tersebut ke arah Z agar dapat dipotong dengan komponen **Brep | Brep**.
- **Brep | Brep** digunakan untuk memotong dua bidang surface.

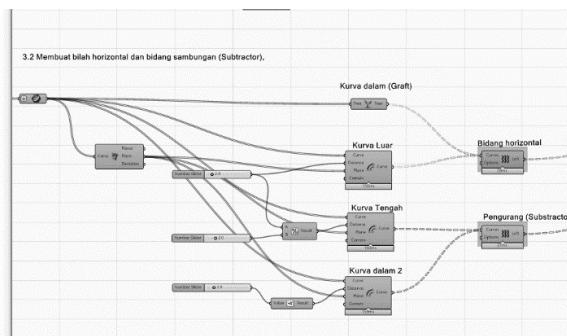
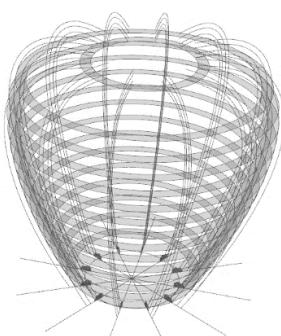


3. MEMBUAT BILAH VERTIKAL DAN BIDANG SAMBUNGAN (SUBTRACTOR)

3.1 Membuat bilah vertikal dan bidang sambungan (Subtractor),



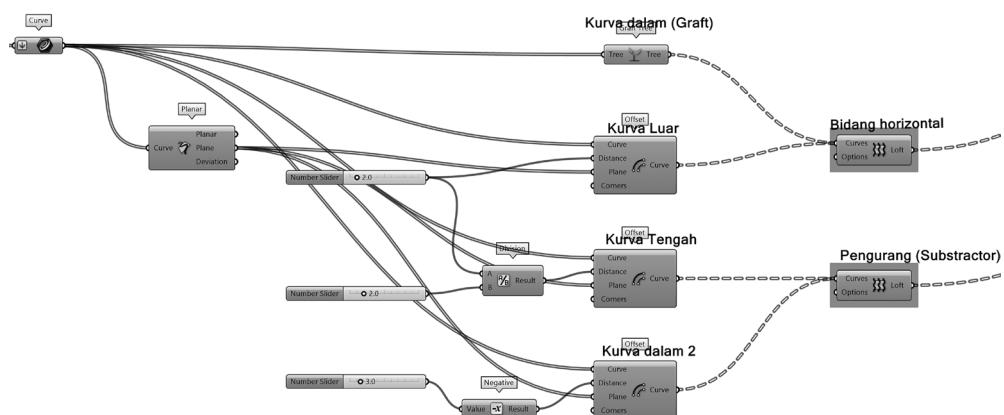
- Ekstrak masing-masing kurva/ bilah vertikal dan lakukan beberapa kali Offset yang tujuannya adalah membuat bidang untuk bilah vertikal, dan kedua, membuat bidang vertikal untuk pengurang/sambungan (subtractor) yang akan nanti bertemu dengan bilah-bilah horizontal, melalui sambungan slit (slit joint).



- Proses yang sama untuk bilah-bilah horizontal



3.2 Membuat bilah-bilah horizontal dan bidang sambungan (Subtractor),

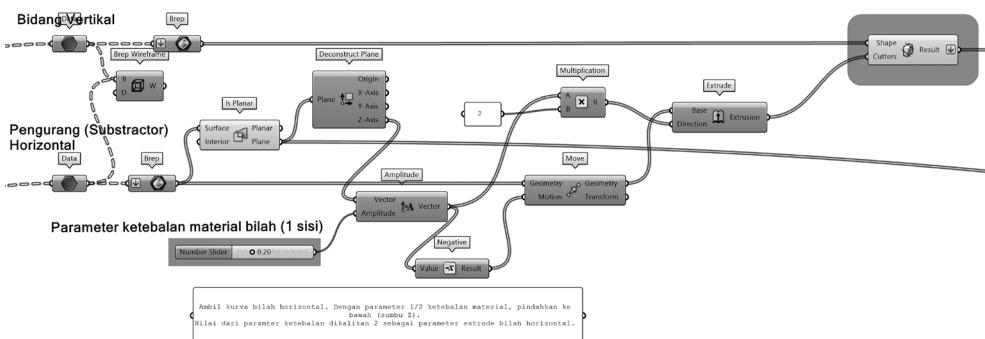


- Bilah-bilah vertikal dikurangi bagian dari bilah-bilah horizontal, dengan ketentuan, tebal bidang yang hilang di bilah-bilah veryikal ini harus minimal sama dengan tebal bilah horizontal (atau ada toleransi 2-3mm untuk mempermudah proses perakitan).
- Setiap kurva bidang horizontal ditentukan koordinat Z menggunakan komponen **Deconstruct Plane**. Informasi Z ini digunakan sebagai nilai vector untuk memindahkan setiap bilah kurva horizontal dengan nilai 0.5 kali ketebalan material (atau jika ada toleransi, berarti 0.6 atau 0.65 kali ketebalan material horizontal).
- **Extrude** setiap bilah horizontal dengan nilai 2 kali parameter ketebalan material.
- Gunakan komponen **Trim Solid** untuk memotong Surface bilah-bilah vertikal dengan bilah-bilah horizontal yang sudah memiliki ketebalan.

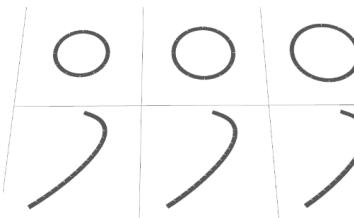


4. MEMBUAT SAMBUNGAN SLIT ANTAR BIDANG-BIDANG

4.1 Slit pada bidang-bidang vertikal dengan ketebalan material bidang horizontal

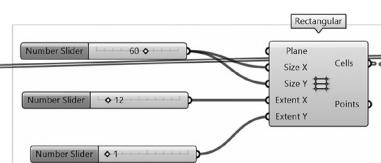


- Proses yang sama untuk menentukan bilah-bilah horizontal yang terpotong oleh ketebalan bilah-bilah vertikal.

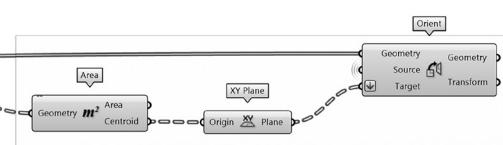


5. MENYUSUN GEOMETRI UNTUK PEMOTONGAN

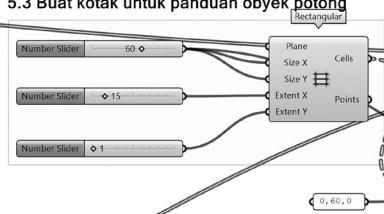
5.1 Buat kotak untuk panduan obyek potong



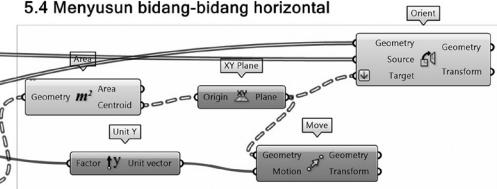
5.2 Menyusun bidang-bidang vertikal



5.3 Buat kotak untuk panduan obyek potong



5.4 Menyusun bidang-bidang horizontal

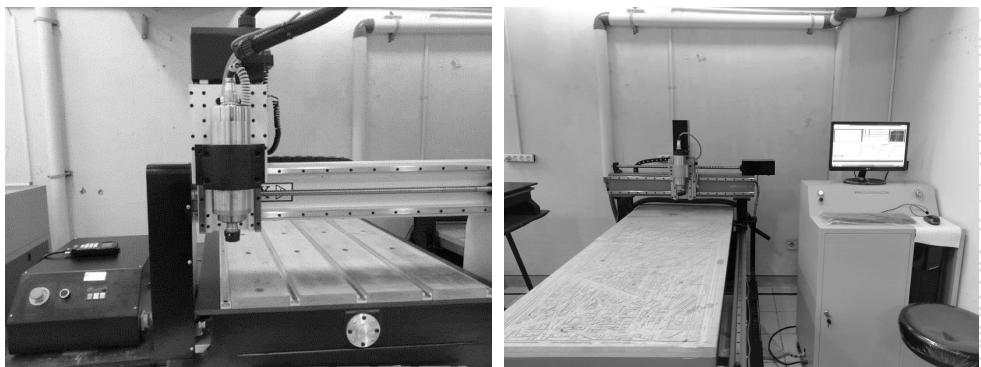


- Buat **Rectangular Grid** dengan dimensi sesuai ukuran material yang akan dipotong dan skala obyeknya (misalnya, ukuran A2, A3 atau ukuran lain).
- Pada prinsipnya, hasil bilah-bilah vertikal dan bilah-bilah horizontal yang masing-masing sudah dipotong oleh ketebalan bidang (slit) akan diproyeksikan pada grid ini.
- Gunakan komponen **Orient** untuk memetakan atau mengorientasikan obyek vertikal ke bidang XY dan obyek horizontal dengan perbedaan nilai Z ke bidang XY.

- Kita dapat secara manual menyusun ulang bilah-bilah yang sudah terpetakan pada bidang XY ini, misalnya jika kita ingin lebih efektif menggunakan material potong, dan juga menambahkan label/tag secara manual.

10.2. Pemodelan Untuk Fabrikasi dengan CNC Milling

CNC (*Computer Numerical Control*) Milling Router adalah jenis router yang digunakan untuk memotong (*cut*) dan menggiling/mengebor (*mill*) beberapa jenis bahan yang lebih tebal dan lebih keras dibanding bahan yang bisa dipotong atau di-grafir menggunakan Laser Cutter. Beberapa bahan tersebut adalah: kayu, komposit, Styrofoam, aluminium dan plastic. Perbedaan dengan mesin Laser Cutter selain media potong, karakteristik bahan, adalah selain bergerak pada bidang XY, *head* CNC Milling dapat bergerak pada sumbu Z. Mesin ini dinamakan 3-Axis CNC Milling Router. Dengan memiliki pergerakan pada tiga sumbu, maka mesin ini dapat melakukan pemotongan, grafir, mengebor secara simultan bentuk-bentuk seperti topografi, bentuk kurvalinier dan sejenisnya. Beberapa mesin CNC milling memiliki lebih dari 3 Axis: 4 Axis dan 5 Axis.

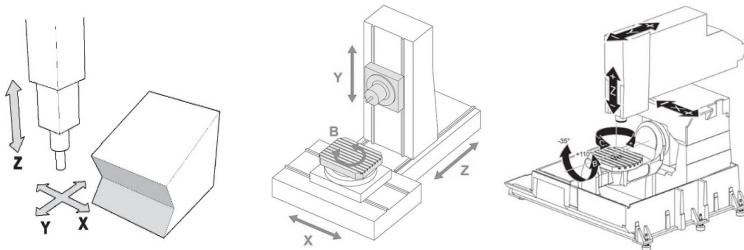


Gambar 220. Mesin CNC Milling Router

Bidang potong mesin CNC Milling tergantung dari jenis mesinnya, mulai dari 40cm x 40cm hingga 90cm x 120cm. Tebal material yang bisa diproses dengan mesin ini juga bervariasi dan umumnya lebih tebal dari yang bisa dipotong oleh mesin Laser Cutter, yakni hingga 10-15cm.

Alat potong pada mesin CNC Milling adalah mata bor (*Milling Head- Bit*) logam yang memiliki beberapa variasi diameter. Mata bor inilah yang akan berputar dan mengebor permukaan pada bidang XY dan juga pada arah Z (naik-turun), sehingga setiap mesin CNC Milling memerlukan instruksi untuk mengendalikan pergerakan Bit pada ruang 3D. Ini yang dinamakan *Toolpath*. Berbeda dengan mesin Laser Cutter yang tidak memerlukan informasi Toolpath, Mesin CNC Milling memerlukan Toolpath untuk menentukan rute pergerakan Bit Ketika akan memotong/mengebor bidang potong.

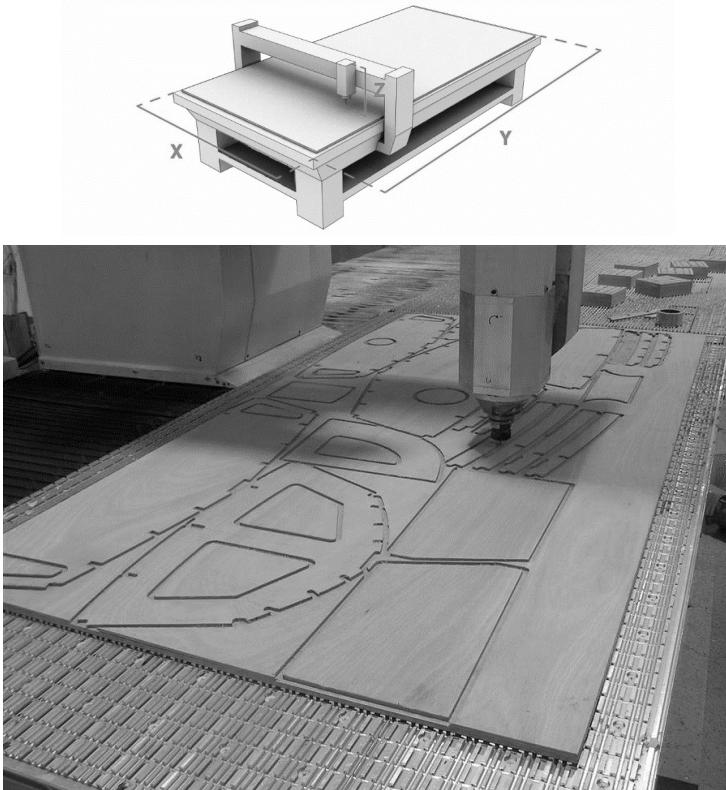
Kemampuan mesin CNC Milling dalam memproduksi obyek 3D tergantung dari jenis mesinnya. Semua mesin CNC Milling 3 axis dapat melakukan pekerjaan pada bidang 2D.



Gambar 221. Ki-Ka: 3axis, 4axis, 5axis CNC Milling Router

- Mesin CNC Milling 2 axis: memotong bidang, menggrafir dan pekerjaan 2D lain pada bidang potong.
- Mesin CNC Milling 3 axis: membuat topografi dan permukaan 3D
- Mesin CNC Miling 4 axis: membuat obyek-obyek 3D yang memiliki simetri putar dan obyek 3D lain.

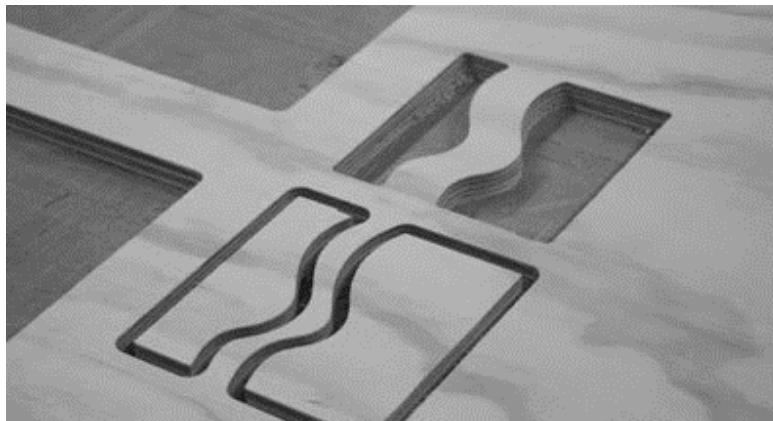
CNC milling router adalah mesin yang umumnya digunakan di industri untuk memproduksi perangkat-perangkat berbasis kayu, furniture, produk industri lainnya karena kapabilitas dalam memotong dan memproduksi bentuk-bentuk geometri secara akurat. Dalam bidang arsitektur mesin ini digunakan misalnya untuk membuat panel fasad, sambungan, cetakan fabrikasi, model topografi, model struktur dan lainnya.



Gambar 222. Produksi profiling dalam proses 2 Axis. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

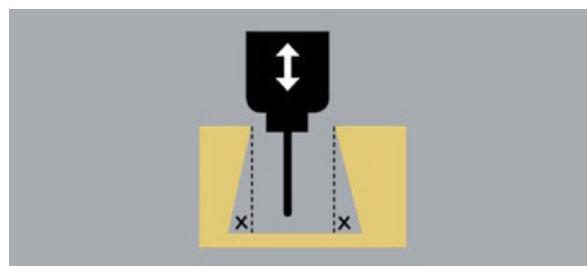
10.2.1. Pengenalan Umum CNC

1. Mesin CNC tidak dapat menghasilkan sudut siku, apalagi sudut lancip ($<90^\circ$) dikarenakan diameter mata bor (*bit*). Karena hanya dapat menghasilkan sudut yang memiliki radius (*rounded corner*) maka ada beberapa teknik yang digunakan khususnya bila memproduksi elemen atau komponen yang akan disambungkan, misalnya *finger joints*.



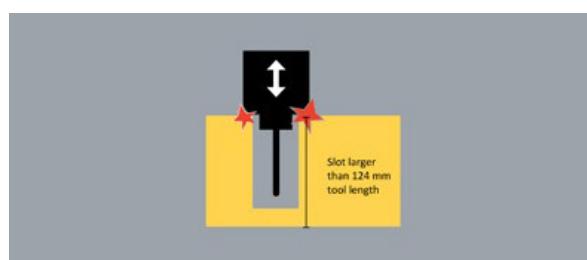
Gambar 223. Sudut beradius. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

2. Mesin CNC tidak dapat memproduksi obyek-obyek yang memiliki ruang-ruang dalam pada ketebalan materialnya (*hidden pocket*) dikarenakan mata bor (*bit*) hanya dapat bergerak tegak lurus bidang potong/ bidang bor.



Gambar 224. *Hidden Pocket*. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

3. Kedalaman area bor atau area potong tergantung dari panjang mata bor yang digunakan.



Gambar 225. *Bit Length*. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

10.2.2. Material

Material yang dapat diproses menggunakan mesin-mesin CNC Milling umumnya dalam kategori berbasis kayu: plywood, kayu blok, MDF, berbasis busa: styrofoam, XPS (Extruded Polystyrene), gips, akrilik. Khusus untuk mesin-mesin CNC di Lab Fabrikasi, material dan dimensi sebagai berikut:

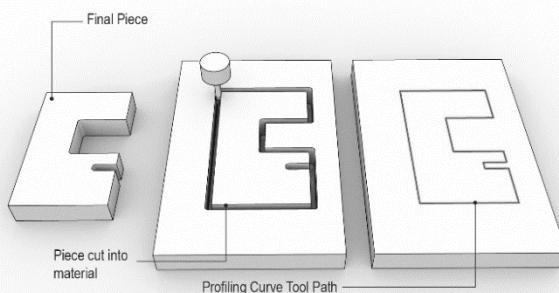
| Jenis mesin | Bahan Potong | Dimensi Potong |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Roland MDX 540S | Basis kayu, plastic, foam | (p.l.t): 350mmx350mmx150mm |
| Flatbed CNC Milling | Basis kayu, plastic, foam | (p.l.t): 1200mmx900mmx100mm |

10.2.3. 2-Axis Milling

Proses pengeboran pada material bidang yang relatif hampir sama dengan proses pemotongan dengan mesin Laser Cutter. Perbedaannya adalah mata bor pada mesin CNC Milling Router dapat bergerak naik-turun pada sumbu Z sehingga dapat digunakan untuk memberi bidang yang lebih tebal dibanding Laser Cutter.

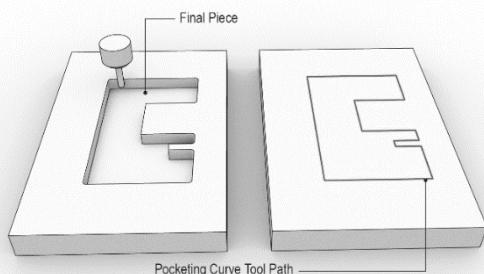
Ada dua jenis pekerjaan pengeboran:

1. **Profiling:** proses memotong obyek, mirip dengan proses pemotongan pada mesin Laser Cutter.



Gambar 226. *Profiling*. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

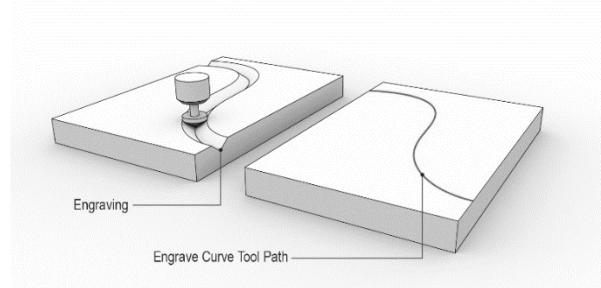
2. **Pocketing:** proses yang menghilangkan sebagian material yang berada di dalam batas curve tool path (closed curve).



Gambar 227. *Pocketing*. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

- Perbedaan kedalaman pengeboran ditentukan oleh perbedaan layer di software, misalnya AutoCAD atau Rhinoceros.

3. **Engraving:** proses meng-grafir material, menghilangkan sebagian material sesuai dengan lintasan/*path* yang ditetapkan.



Gambar 228. *Engraving* (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

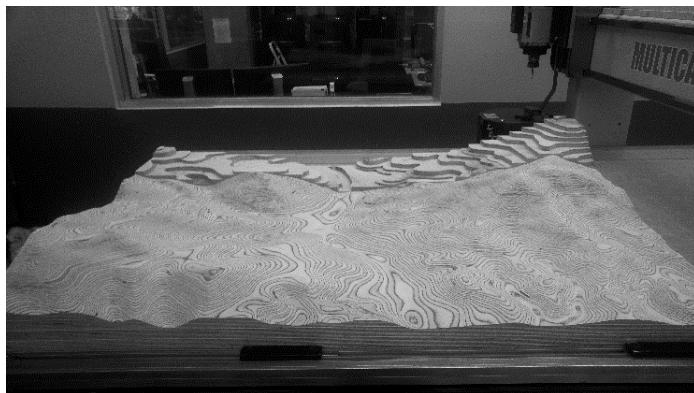
10.2.4. Prinsip Pemodelan Untuk 2 Axis CNC

Prinsip pemodelan obyek yang akan dipotong, dibor (2 Axis) dengan mesin CNC Milling Router dapat dirangkum sebagai berikut:

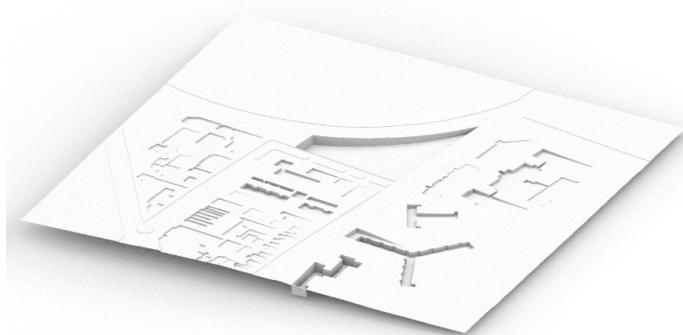
1. Mesin CNC Milling hanya dapat memotong/membor lurus bidang potong. Mesin tidak dapat melakukan pemboran jika ada bidang-bidang yang memiliki lekukan miring ke arah dalam.
2. Pastikan obyek yang dirancang sesuai dengan dimensi material sesuai spesifikasi mesin-mesin CNC Milling Router.
3. Terkait geometri:
 - Pastikan semua kurva/garis adalah planar.
 - Gabungkan/ *join* kurva tertutup dan hindari **obyek-obyek duplikasi**. Semua closed geometry dapat digunakan untuk *Profiling* dan *Pocketing*.
 - Jarak antar garis/kurva kurang lebih 30mm.
 - Hindari melakukan *Grouping*.

10.2.5. 3-Axis Milling

Proses pengeboran pada mesin 3-Axis CNC milling memungkinkan proses ‘pemahatan’ dilakukan pada obyek yang lebih tebal dibanding mesin Laser Cutter. Contoh penggunaannya adalah untuk membuat obyek berkontur/ topografi, cetakan (*mold*) atau permukaan yang melengkung.



Gambar 229. Contoh hasil topografi menggunakan CNC Milling Router.
(Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

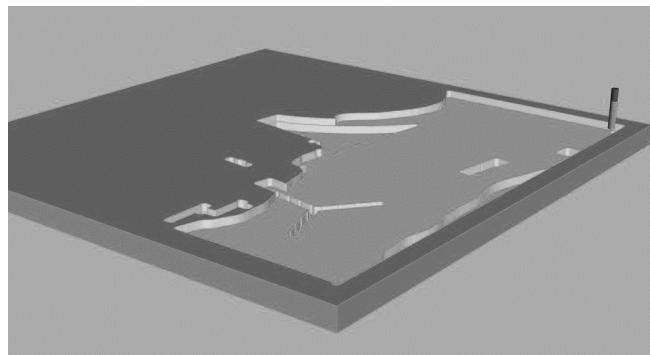


Gambar 230. Contoh model geometri. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

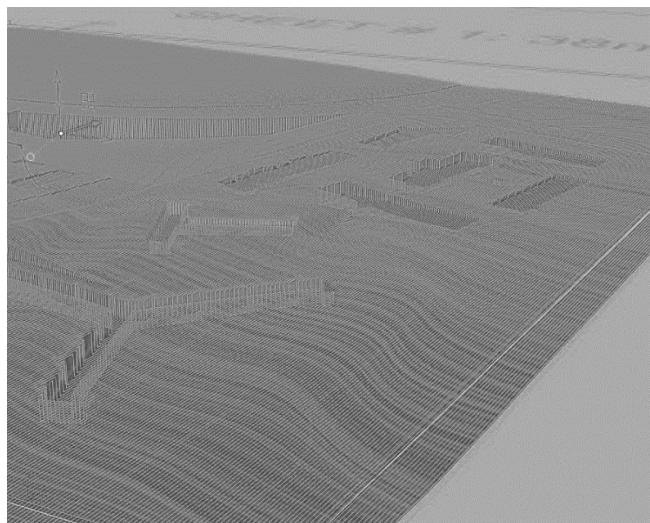
Proses pengeboran yang melibatkan pekerjaan melubangi, mengurangi sebagian material melibatkan pembuatan *Toolpath* atau menentukan urutan jalur atau lintasan yang dilalui oleh mata bor/*bit*. Beberapa software dapat melakukan simulasi hasil final atas toolpath yang ditentukan sehingga kita dapat mengecek hasil sebelum dilakukan pengeboran.

Proses toolpath ini secara umum ada tiga macam:

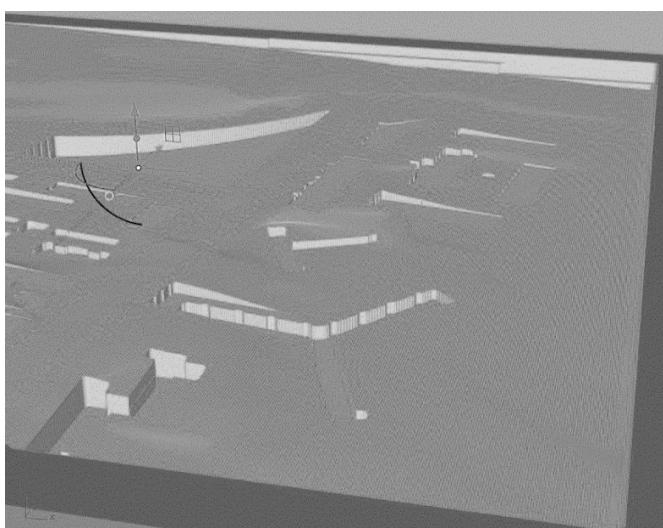
1. **3 Axis Roughing:** proses menghilangkan material yang ditentukan dari desain dan dilakukan secara cepat dan tidak terlalu akurat.
2. **3 Axis Parallel Finishing:** proses melakukan pengeboran dan pemahatan sesuai dengan desain. Proses ini memakan waktu yang lebih lama karena lebih akurat.
3. **2 Axis Profiling:** proses memotong geometri dan memisahkan dari material sisa.



Gambar 231. 3 Axis Roughing Toolpath Simulation. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)



Gambar 232. 3 Axis Parallel Finishing Toolpath. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)



Gambar 233. 3 Axis Toolpath Simulation. (Sumber: Makerspace, Melbourne School of Design)

10.2.6. Prinsip Pemodelan Untuk 3 Axis CNC

Secara umum prinsip pemodelan obyek yang akan dipotong, dibor menggunakan 3 axis dengan mesin CNC Milling Router hampir sama dengan prinsip pada 2 axis dan dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Mesin CNC Milling hanya dapat memotong/membor tegak lurus bidang potong. Mesin tidak dapat melakukan pemboran jika ada bidang-bidang yang memiliki lekukan miring ke arah dalam.
2. Pastikan obyek yang dirancang sesuai dengan dimensi material sesuai spesifikasi mesin-mesin CNC Milling Router.
3. Terkait geometri:
 - Gabungkan semua obyek geometri menjadi satu obyek, menggunakan *BooleanUnion* di RH.
 - Meminimalisir duplikasi dan geometri yang saling berpotongan (*intersection geometry*).
 - Setiap proses toolpath dibedakan berdasarkan *layer* di software pemodelan 3D.

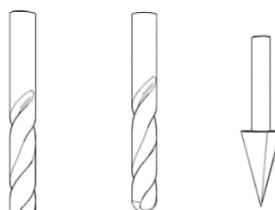
10.2.7. Keterbatasan Mesin CNC Milling Router

Keterbatasan kapabilitas mesin CNC adalah:

1. Mesin tidak dapat digunakan untuk memproduksi komponen-komponen kecil dikarenakan ukuran matabor/ *bit* terkecil sekitar 3-4mm. Kebanyakan proses *milling* dilakukan dengan matabor diameter 6 mm atau lebih.
2. Tingkat presisi mesin juga ditentukan oleh kualitas material dan proses *vacuum* yang dilakukan ketika proses pengeboran berlangsung.

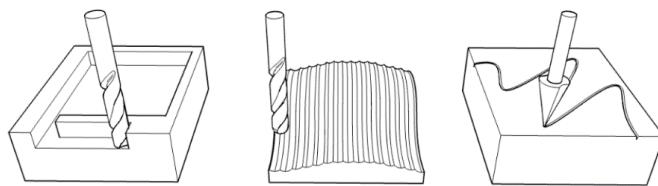
10.2.8. Fabrikasi dengan CNC Milling Router

Seperti halnya mesin laser cutter, mesin Milling dapat memotong bidang yang lebih tebal secara cukup akurat. Tidak seperti mesin Laser Cutter yang memiliki mata laser dengan diameter tertentu, mesin Milling akan memiliki mata bor (*bit*) yang berbeda-beda dan dapat diganti-ganti. Secara umum ada tiga jenis mata bor: 1) *flat end*; 2) *ball end*; 3) *vee (V)*

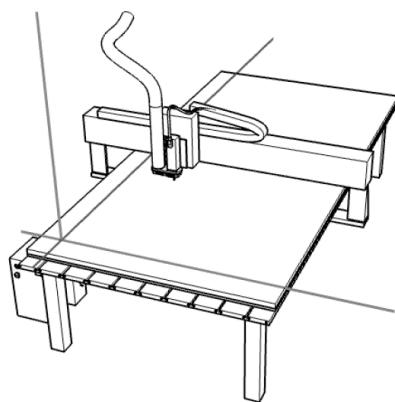


Gambar 234. 1) *Flat*; 2) *Ball*; 3) *Vee* (Sumber: CNC Walkthrough GSAPP Fabrication Lab, 2017)

Mata bor yang berbeda digunakan untuk jenis pemotongan yang berbeda:



Gambar 235. 1) Profil potong *Flat*; 2) Profil potong *Ball*; 3) Profil potong *Vee*
(Sumber: CNC Walkthrough GSAPP Fabrication Lab, 2017)



Ketika kita akan memproduksi obyek hasil desain menggunakan mesin milling, hal kedua setelah memahami apa itu mesin *Milling* adalah memahami bahwa mesin Milling adalah representasi fisik dari ruang virtual dimana obyek 3D kita berada di software 3D (Rhinoceros). Kita bisa membayangkan bahwa kita melihat mesin Milling dari *Top View*.

- Mesin Milling memiliki aksis X dan Y pada bidang horizontal (Perhatikan orientasi X dan Y berbeda-beda di setiap mesin).
- Memiliki aksis Z secara vertikal.

10.3. Pemodelan untuk Fabrikasi dengan 3D Printer

3D Printing adalah proses memproduksi obyek solid 3D dari file digital. Proses ini disebut sebagai *Additive Manufacturing* karena obyek 3D yang dihasilkan berasal dari akumulasi atau penambahan lapisan demi lapisan bahan 3D printing yang disemprotkan oleh mesin printer. Istilah *Rapid Prototyping* atau 3D Printing digunakan untuk menggambarkan teknik *additive* ini yang memungkinkan para desainer menghasilkan obyek-obyek yang tidak dapat dilakukan menggunakan mesin-mesin CNC berbasis teknik *subtractive*. Obyek-obyek yang memiliki pelubangan di dalam obyek, bentuk-bentuk cabang, bentuk-bentuk yang lebih kompleks dan juga komponen-komponen bergerak (*gear* dan sejenisnya) dapat diproduksi dengan skala tertentu menggunakan 3D Printer.



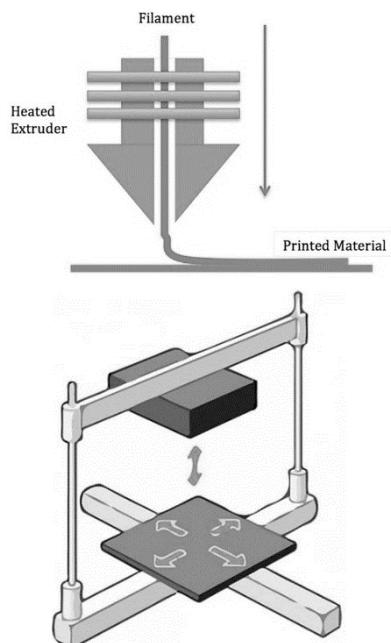
Gambar 236. 3D Printer

Proses *Additive Manufacturing* melibatkan tiga tahapan:

1. Pembuatan model 3D di software pemodelan 3D. Pada umumnya file 3D dari software-software ini dikonversi dalam format yang dapat dibaca oleh software pemroses 3D printing, seperti format .STL (*Standard Tessellation Language*).
2. Pembacaan format .STL di software yang kompatibel dengan mesin 3D Printer. Salah satu software tersebut adalah: **Simplify3D** yang kompatibel dengan mesin 3D **Printer FelixPro XL**. Pada tahap ini juga dilakukan beberapa setting.
3. Proses printing obyek 3D.

Ada beberapa teknologi 3D printing yakni:

1. **Stereolithography (SLA)**: menggunakan sinar laser dan resin untuk mencetak obyek 3D.
2. **Selective Laser Sintering (SLS)**: menggunakan sinar laser CO₂ dan serbuk thermoplastic polimer untuk mencetak obyek 3D.
3. **Fuse Deposition Modeling (FDM)**: memanaskan filamen plastik dan mencetak (*deposit*) lapisan demi lapisan sesuai dengan obyek 3D yang akan dicetak. Pada teknologi ini, diperlukan komponen pendukung struktur untuk obyek-obyek memiliki elemen *overhang*. Teknologi FDM umumnya menggunakan dua macam bahan plastik: ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) dan PLA (*Polylactic Acid*). Keduanya adalah bahan thermoplastic yang akan meleleh jika dipanaskan dan akan mengeras jika dalam temperatur kamar. PLA adalah biodegradable plastic dengan kondisi tertentu. Tingkat akurasi teknologi FDM tergantung jenis printer namun berkisar antara 0.75-1.2mm.



Gambar 237. Diagram Cara Kerja 3D Printer. (Sumber: <https://all3dp.com>)

Perbandingan antara material ABS dan PLA:

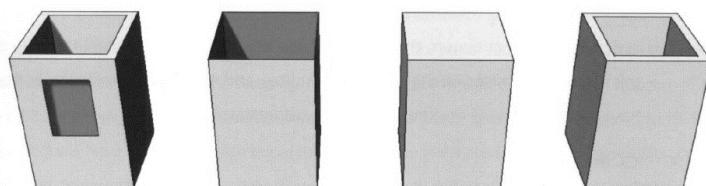
Tabel 4. Perbandingan Material 3D Printer

| Properti | ABS | PLA |
|----------------|---|--|
| Kegunaan | Lebih cocok digunakan untuk hasil yang memerlukan kekuatan, lebih stabil secara termal dan lebih keras. | Lebih cocok digunakan untuk hasil akhir yang lebih detil, lebih halus. |
| Sustainability | Recycleable | Bio-degradable (48 bulan di dalam air) |
| Finishing | Acetone untuk menghaluskan permukaan atau dengan amplas (sander) | Acetone untuk menghaluskan permukaan atau dengan amplas (sander) |

10.3.1. Karakteristik Obyek Yang Dapat dicetak di Mesin Printer 3D (*Printable Object*)

1. *Closed Geometry (watertight):*

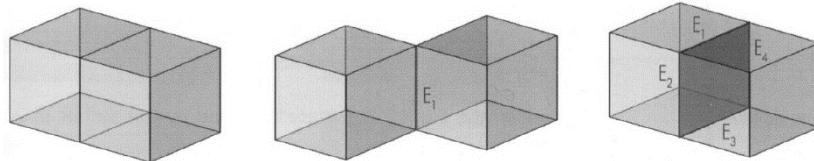
- Tidak boleh ada permukaan dalam (inner/inside face) yang terlihat dari luar. Dengan kata lain, hanya permukaan luar (outside) yang terlihat dari luar. Contoh sebagai berikut.



Permukaan Dalam (Inside Face-warna merah) tidak boleh terlihat dari luar. Pada contoh di atas, hanya dua obyek di kanan yang akan dapat dicetak di printer 3D.

2. *Manifold Mesh:*

- Hanya model yang termasuk kategori manifold yang dapat dicetak dengan baik. Sebuah geometri dikatakan manifold jika tidak memiliki *edge* yang memiliki lebih dari dua *face* atau tidak memiliki *edge* yang berhimpitan. Contohnya sebagai berikut.



Gambar 238. Ki-Ka: Manifold; Non-manifold; Non-manifold.
(Sumber: Algorithms-Aided Design, Arturo Tedeschi, 2014)

3. *Orientable Mesh:*

- Geometri harus berupa *orientable mesh* artinya semua vector normal mengikuti aturan yang sama.

4. *No Self-Intersection:*

- Geometri tidak dibentuk dari obyek-obyek yang berpotongan (intersection), atau kalaupun dibentuk oleh obyek solid yang berpotongan, harus menggunakan metode Boolean.

Beberapa aspek lain yang harus diperhatikan sebelum mencetak obyek adalah:

1. Semua obyek harus berupa solid, artinya memiliki ketebalan dan memiliki properti: *closed geometry*.
2. Perhatikan ukuran maksimum (*build volume*) yang dapat dicetak oleh mesin printer. Model yang memiliki ukuran lebih besar dari *build volume* dapat dibagi kemudian dirakit.
3. Tebal minimum (*minimum wall-thickness*) yang dihasilkan oleh printer yang tergantung juga oleh jenis printer. Tebal minimum FDM-based printer misalnya Felixpro XL sekitar 0.8mm.
4. Resolusi printer 3D ditentukan oleh resolusi horizontal (XY) dan resolusi vertical (Z) yang tergantung dari jenis printer dan material. Umumnya resolusi XY sekitar 1 micron (0.1mm) dan resolusi Z adalah 0.8mm. Detil-detil yang lebih kecil dari kedua resolusi ini tidak dapat dicetak.
5. Beban gravitasi juga harus diperhatikan, terutama jika mencetak obyek dimensi cukup besar yang memiliki nilai eksentrisitas tinggi.

REFERENSI

- Aish, Robert (2013). *First Build Your Tools*, dalam: *Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design*, John Wiley & Sons Ltd., New York, USA.
- Akos, Gill & Ronnie Parsons (2014). Modelab Grasshopper Primer Third Edition. Studio Mode. USA
- Aranda, Benjamin & Chris Lasch (2006). Tooling. Pamphlet Architecture Book Series, Volume 27, Princeton Archit.Press. USA
- Beecher, Karl (2017). *Computational Thinking: A beginner's guide to problem-solving and programming*. BCS, The Chartered Institute for IT, USA.
- Carpo, Mario (2011). The alphabet and Algorithm, MIT Press.USA
- Davis, Daniel (2013). *Modelled on Software Engineering: Flexible: Parametric Models in the Practice of Architecture*. Doctoral Thesis, Royal Melbourne Institute of Technology
- Filson, Anne, Gary Rohrbacher & Anna Kaziunas France (2017). *Design for CNC*. Maker Media Inc. Canada
- Gerber, David Jason (2007). *Parametric Practices: Models for Design Exploration in Architecture*. Doctoral Thesis, Harvard Graduate School of Design. USA
- Isaa, Rajaa (2020). Essential Algorithms and Data Structures for Computational Design in Grasshopper. Robert Mc Neel & Associates, USA.
- Jabi, Wassim (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King, London. UK
- Schumacher, Patrik (2009). Parametricism- A New Global Style for Architecture and Urban Design, dalam: AD/ Architectural Design- Digital Cities, Vo. 79, Iss. 4, Juli-Agustus 2009. Wiley, New York, USA.
- Tedeschi, Arturo (2014). *AAD-Algorithm-Aided Design, Parametric Strategies using Grasshopper*. Le Penseur, Brienza, Italy.
- Woodbury, R. (2010). *Elements of Parametric Design*. Routledge, New York, USA.